

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» Физический факультет



Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Филиал в Севастополе

НАУЧНО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЙ ЦЕНТР «ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ»

ДЕВЯТАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ

ФИЗИЧЕСКОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ГЕОСРЕДАХ

МОСКВА, ИПМЕХ РАН, 18-20 ОКТЯБРЯ 2023

СБОРНИК МАТЕРИАЛОВ КОНФЕРЕНЦИИ NINTH INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE - SCHOOL FOR YOUNG SCIENTISTS

PHYSICAL AND MATHEMATICAL

MODELING OF PROCESSES

IN GEOMEDIA

MOSCOW, IPMECH RAS, OCTOBER 18-20, 2023 PROCEEDINGS MOCKBA 2023 УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8 ББК 22.2 + 22.3 + 26.2 В

Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Девятая международная научная конференция-школа молодых ученых; 18-20 октября 2023 г., Москва: Материалы конференции. – М.: ИПМех РАН, 2023–186 с.

ISBN 978-5-91741-288-7

В сборнике материалов конференции представлены доклады участников 9-ой Международной научной конференции-школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в виде коротких статей. Тематика Школы охватывает широкий спектр фундаментальных и прикладных исследований процессов во всех природных средах: в недрах Земли, океане, атмосфере. Центральное место в работе Школы занимают вопросы, связанные с разработкой месторождений углеводородного сырья. Большое внимание уделено исследованию течений в сложных неоднородных жидкостях, экологическим проблемам, изучению антропогенного вклада в динамику природных систем.

Ключевые слова: процессы в геосредах, математическое и лабораторное моделирование, нефтяные и газовые месторождения, неоднородные жидкости, течения в сложных средах.

УДК 531 + 532 + 556 + 550.3 + 550.8 ББК 22.2 + 22.3 + 26.2

Key words: geomedia, mathematical and laboratory modelling, oil and gas production, inhomogeneous fluids, fluxes in complex media.



ОРГАНИЗАТОРЫ ШКОЛЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

Физический факультет Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» Филиал в Севастополе

ТЕМАТИЧЕСКИЕ НАПРАВЛЕНИЯ ШКОЛЫ:

теоретические и экспериментальные исследования процессов в атмосфере, океане, литосфере, их взаимодействия;

широкий круг проблем, связанных с добычей углеводородного сырья;

экологические проблемы окружающей среды;

проблемы антропогенного воздействия на окружающую среду;

методы геофизических исследований.

ПРОГРАММНЫЙ КОМИТЕТ

Председатель – академик Д.М. Климов (ИПМех РАН), заместитель председателя – д.т.н. В.И. Карев (ИПМех РАН), заместитель председателя – профессор К.В. Показеев (МГУ), ученый секретарь – д.ф.-м.н. Т.О. Чаплина (ИПМех РАН), профессор Л.А. Абукова (ИПНГ РАН), профессор В. Бабанин (Технологический Университет Суинберн, Австралия), академик НАН Армении В.Н.Акопян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), Dr. Ian Gray (Sigra, Австралия), академик И.Г.Горячева (ИПМех РАН), академик А.Н. Дмитриевский (ИПНГ РАН), чл.-корр. РАН П.О. Завьялов (ИО РАН), профессор А.С. Запевалов (МГИ РАН), профессор Зацепин А.Г. (ИО РАН), профессор И.А.Знаменская (МГУ), д.ф.-м.н. А.В. Кистович (ИПМех РАН), д.ф.-м.н. Ю.Ф. Коваленко (ИПМех РАН), профессор Б.В. Лаппин (МГУ, ИПГ Росгидромета), академик В.П. Матвеенко (ИМСС УРО РАН), профессор Л.А.Назарова (ИГД СО РАН), академик Р.И. Нигматулин (ИО РАН), профессор В.Н. Носов (ГЕОХИ РАН), профессор И.А.Репина (ИФА РАН), профессор А. Саакян (Институт механики Национальной академии наук, Армения), профессор Б.Г.Тарасов (Университет Западной Австралии), профессор В.В. Фадеев (МГУ), чл.-корр. РАН Н.Н. Филатов (ИВПС КарНЦ РАН), директор Филиала МГУ в Севастополе О.А Шпырко, профессор А.А. Шрейдер (ИО РАН), чл.-корр. РАН С.Е. Якуш (ИПМех РАН), профессор Р. Янг (Университет Торонто, Канада).

Статьи в сборнике опубликованы в соответствии с материалами, предоставленными авторами, ответственность за достоверность и авторство содержания полностью лежит на авторах.

МЕСТО ПРОВЕДЕНИЯ ШКОЛЫ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук

119526, Москва, проспект Вернадского, д. 101, корп. 1

ORGANIZERS OF THE SCHOOL

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences

Faculty of Physics of Lomonosov Moscow State University

Lomonosov Moscow State University Branch in Sevastopol

SCIENTIFIC PROGRAM TOPICS:

theoretical and experimental studies of processes in the atmosphere, ocean, lithosphere and their interactions; a wide range of problems associated with hydrocarbon production;

ecological problems of the environment;

problems of human impact on the environment;

methods of geophysical research.

Articles in the book are published in accordance with the materials provided by the authors, the responsibility for the accuracy and authorship of the content is completely assigned to the authors.

SCHOOL VENUE

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of RAS 119526, Russia, Moscow, Vernadskogo avenue, 101-1

ПРЕДИСЛОВИЕ

9-ая Международная конференция - школа молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» в девятый раз проводится в Институте проблем механики имени А.Ю. Ишлинского Российской академии наук. Этот молодежный научный форум проводится на регулярной основе и вызывает большой интерес в научном сообществе. Значительно расширилась география участников: ныне она охватывает всю страну от Калининграда до Камчатки и Сахалина, от Санкт-Петербурга до Севастополя.

Первые восемь Школ молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» успешно прошли в ИПМех РАН в 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 и 2022 г. Они собирали каждая более 100 участников, две трети из которых составили молодые ученые и специалисты. Все доклады сопровождались активными обсуждениями и широкой дискуссией, которая продолжалась и после окончания программных заседаний. По окончании работы 2-ой Школы было принято решение о целесообразности издания полных текстов наиболее интересных докладов, представленных на Школе. Они были опубликованы в научном журнале «Процессы в геосредах», №4, 2016. Труды 3-ей, 4-ой, 5-ой, 6-ой, 7-ой и 8-ой Международных научных школ молодых ученых "Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах" изданы в виде сборников научных статей издательством «Springer» с индексацией их в международных базах данных Scopus и WOS.

Проведение 9-ой Международной конференции- школы молодых ученых «Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах» ориентировано на привлечение внимания молодых ученых, как приступивших к самостоятельной работе, так и начинающих – студентов старших курсов и аспирантов, к теоретическим и прикладным аспектам проблем, возникающих при изучении природных процессов в различных геосредах, взаимовлияния техногенной деятельности и окружающей среды. Наиболее перспективными направлениями исследований были признаны следующие: развитие геомеханического подхода к решению проблем нефтегазодобычи; физическое и математическое моделирование процессов деформирования и разрушения твердых сред и изучение их взаимовлияния на фильтрацию; создание эффективных математических моделей и экспериментальной базы для исследования течений в сложных неоднородных жидкостях, экологические проблемы, изучение антропогенного вклада в динамику природных систем.

Исследования процессов в различных природных средах: литосфере, гидросфере, атмосфере их взаимовлияния, техногенного вклада в их протекание - являются чрезвычайно актуальными и во многом нерешенными задачами естествознания. В современных условиях, когда крупные и доступные месторождения истощаются, все большую остроту приобретает проблема расширения ресурсной базы углеводородного сырья. Особенно это важно для нашей страны, имеющей потребность в больших объемах энергоресурсов, традиционно занимающей ведущие позиции в мире по нефтегазодобыче и получающей серьезные поступления в бюджет от экспорта нефти и газа. Новыми источниками могут быть сланцевая нефть и газ, углеводороды Арктики, газогидраты, глубокие и сверхглубокие месторождения нефти и газа. По мнению многих специалистов именно «глубокая нефть» может стать наиболее перспективным источником расширения ресурсной базы углеводородного сырья. Для их освоения требуется создание новых эффективных низкозатратных экологически чистых технологий. Ученые, занимающиеся изучением процессов в геосредах, могут и должны направить свои усилия на создание научного фундамента таких технологий. Развитие новых прорывных подходов к разработке месторождений углеводородного сырья очень важно в современных геополитических условиях и требует привлечения умов и сил молодых ученых с их энтузиазмом, напористостью и нестандартным видением задач и путей их решения. Эффективным инструментом для обмена информацией и организации междисциплинарных исследований процессов в геосредах могут стать международные мероприятия, в том числе молодежные научные школы.

На 9-ю Конференцию-школу представлено значительное число докладов, посвященных моделированию процессов в сложных геодинамических системах, в том числе в связи с проблемами нефтегазодобычи. Увеличилось число докладов, посвященных экологическим проблемам.

К участию в Конференции-Школе приглашаются ученые всех специализаций: экспериментаторы, аналитики и вычислители. Известными специалистами будут прочитаны лекции в ключевых разделах механики, физики, геофизики. Предполагаются доклады молодых ученых, выполнивших глубокие оригинальные исследования. Программным комитетом, куда вошли ведущие ученые по научным направлениям Конференции-Школы, было проведено рецензирование поступивших на школу докладов и произведен конкурсный отбор. К началу работы Школы издан сборник материалов докладов, отобранных на Конференцию-Школу. По окончании ее работы наиболее интересные доклады, представленные на английском языке, в виде статей будут опубликованы издательством Springer в серии Geo Sciences Conference Proceedings. Также часть докладов будет опубликована в виде научных статей в журнале «Процессы в геосредах».

Организаторы конференции глубоко благодарны признанным ученым, давшим согласие принять участие в ее работе, молодым специалистам аспирантам и студентам, откликнувшимся на приглашение, и, конечно, учреждениям, оказавшим Школе организационную поддержку и финансовую поддержку.

Председатель Программного комитета академик Д.М. Климов

Председатель Оргкомитета профессор В.И. Карев

Зам. Председателя Оргкомитета профессор К.В. Показеев

PREFACE

The Ninth International Scientific Conference-School for Young Scientists "Physical and mathematical modeling of processes in geomedia" is held at the Ishlinskii Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences for the ninth time and is of great interest in the scientific community. For the eighth year in a row more than one hundred scientists have taken part in it, two thirds of whom are young researchers.

At the eight previous Schools, participants reports were traditionally accompanied by active discussion which lasted beyond the end of the program sessions. As a result of the work of the School, it was decided to hold the 9 th Conference-Scientific School of Young Scientists "Physical and mathematical modeling of processes in geomedia" in 2023. The most promising areas of research were recognized following ones: the development of geomechanical approach to solving the problems of oil and gas production, physical and mathematical modeling of deformation and fracture of solid media and study of their interaction on the seepage, creation effective mathematical models and experimental base for research of flows in complex heterogeneous liquids, environmental issues, the study of the anthropogenic contribution to the dynamics of natural systems.

The 9 th Youth Forum, as well as the previous four, has to contribute to the solution of fundamental scientific problems arising in the study of natural processes in different geomedia, the impact of anthropogenic activities and the environment. The scientific program of the Conference-School includes: theoretical and experimental studies of processes in the atmosphere, oceans, the lithosphere and their interaction; environmental issues; problems of human impact on the environment; methods of geophysical research. One of the central topics for the Conference-School is associated with the elaboration of scientific bases, the creation of new breakthrough approaches to the development of hydrocarbon deposits, including non-traditional sources.

Research of the dynamics of natural systems - the geosphere, the hydrosphere, the atmosphere - and their interactions, the human contribution to naturally occurring processes are among the most urgent and practically important scientific problems. Intensive development of research in these areas is due to several factors. The widespread introduction of computer technology has allowed beginning calculation of complex phenomena, previously unavailable for analysis. Creation and improvement of a new generation of geophysical instruments, remote observing systems based on the ship, aircraft, and satellite allowed us to obtain a large amount of data to objectively reflect the picture of the processes.

An alternative to the use of hydrocarbons as a main source of energy on the planet in the coming decades is unlikely to be found. At the same time, the resource base of hydrocarbons is quickly depleted, new non-traditional sources are required. Among them, shale oil and gas, hydrocarbons of the Arctic region, gas hydrates, deep and ultra-deep oil and gas deposits. "Deep oil" may be the most promising source of expanding the resource base of hydrocarbons according to many experts. The creation of new breakthrough approaches to the development of hydrocarbon fields is very important in today's geopolitical conditions, and requires the involvement of young minds and strength. International activities, including the youth scientific schools can become an effective tool for exchange of information and the organizing of interdisciplinary research of processes in geomedia.

Scientists of all specialties are invited to participate in the Conference-School: experimenters, analysts and computer specialists. The lectures of prominent experts will be given in key sections of geomechanics and physics. Reports of young scientists who have made a deep original research are expected. Program Committee, which includes the leading scientists on the scientific directions of the Conference-School, has conducted peer review of the reports submitted to the Conference-School and produced a competitive selection. This book presents a collection of reports selected to the Conference-School. Upon completion of the Conference-School, the most interesting reports presented in English will be published by Springer in the Geosciences Conference Proceedings Series. Also part of the reports will be published as scientific papers in the journal "Processes in Geomedia".

The conference organizers are deeply grateful recognized scientists who have given consent to take part in its work, young professionals and post-graduate students who have responded to the invitation, and, of course, the institutions which have provided financial and organizational support to the Conference-School.

Chairman of the Program Committee Academician D.M. Klimov Chairman of the Organizing Committee Professor V.I. Karev Dep. Chairman of the Organizing Committee Professor K.V. Pokazeev

ОГЛАВЛЕНИЕ

| ПРЕДИСЛОВИЕ | 4 |
|---|------------|
| PREFACE | 6 |
| MATHEMATICAL MODELING OF FALLING ROCKS USING OPENFOAM | |
| M.S. Bezuglov, N.S. Orlova | .11 |
| CT-BASED COMPUTATIONAL PORE-SCALE ANALYSIS OF PERMEABILITY AND PORE SPACE | CE |
| GEOMETRY IN GAS CONDENSATE RESERVOIR ROCKS | |
| V.V. Khimulia | .12 |
| THE STUDY OF THE ROLE OF METASTABLE NITROGEN IN MOLECULAR KINETICS OF TITAN | J'S |
| MIDDLE ATMOSPHERE | |
| A.S. Kirillov | .16 |
| DIGITAL STUDY OF STRUCTURAL, FILTRATION AND CAPACITIVE PROPERTIES OF RESERVO | IR |
| ROCKS OF GAS-CONDENSATE FIELDS ON CT-BASED METHODS | |
| V.V. Khimulia, S.O. Barkov, N.I. Shevtsov | .19 |
| GEOPHYSICAL EFFECTS OF A FIRE IN THE MEGA-KHIMKI | .22 |
| S.A. Riabova | .22 |
| VARIATIONS IN THE ELECTRIC FIELD IN THE SURFACE LAYER OF T | HE |
| ATMOSPHERE DURING THE MAGNETIC STORM ON APRIL 23-24, 2023 ACCORDING TO DATA FRO | ЭM |
| MID-LATITUDE OBSERVATORIES | .23 |
| S.A. Riabova, K.N. Pustovalov | .23 |
| FEATURES OF THE FRACTALITY OF TEMPERATURE IN THE WETTERSTEINS MOUNTAINS | |
| S.A. Riabova | .23 |
| INFORMATION ANALYTICAL SYSTEM AS A METHOD OF BASIC RESEARCH AND A TOOL FOR | ЭR |
| DECISION MAKING SYSTEM FOR LAKE ONEGO AND WATERSHED CASE | |
| N.N. Filatov, V.N. Baklagin, A.V. Isaev, S.A. Kondratyev, O.P. Savchuk | .24 |
| LINEAR STABILITY OF THE FILTRATION FLOW WITH THE LIQUID-GAS INTERFACE SURFACE | IN |
| THE FORCHHAMMER APPROXIMATION | .25 |
| P.I. Kozhurina, A.M. Tomasheva, S.V. Gorkunov, G.V. Kolomiytsev | .25 |
| BUILDING A DEEP LEARNING MODEL BASED ON WAVELET SCATTERING DECOMPOSITION FO | ЭR |
| ANALYSIS OF SEISMIC SIGNALS | .28 |
| I.A. Abzalilov, N.A. Baryshnikov, S.B. Turuntaev | .28 |
| THE SIMULATION OF ELECTRONIC KINETICS OF SINGLET OXYGEN IN THE POLAR IONOSPHER | Ε , |
| AT NIGHTGLOW ALTITUDES AND IN SPRITES | •••• |
| A.S. Kirillov | .30 |
| ELASTOPLASTIC MODEL WITH DESTRUCTION FOR SIMULATION OF_LOW-SPEED IMPACT ON A | AN |
| ICE PLATE | •••• |
| E.K. Guseva, V.I. Golubev, V.P. Epifanov, I.B. Petrov | .32 |
| ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ГЛУБОКОГО ОКЕАНА И ЛЕДЯНОІ | ГО |
| ПОКРОВА ОТ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ | |
| В.В. Булатов | .35 |
| ФОРМИРОВАНИЕ СТУРКТУРЫ ЕДИНОИ БАЗЫ ДАННЫХ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ | И |
| ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИИ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА | |
| В.Н. Баклагин | .38 |
| РЕЗОНАНС МОЛЧАНОВА В СОЛНЕЧНОИ СИСТЕМЕ И В ГАЛАКТИКЕ | •••• |
| А.А. Баренбаум | .41 |
| СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ПЛАВАЮЩИМ ПРОДОЛЬНО СЖАТЫМ УПРУГИ | 1M |
| ЛЬДОМ ПРИ НЕЛИНЕИНОМ ВЗАИМОДЕИСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛН | · · · · |
| А.А. Букатов | 45 |
| ВЛИЯНИЕ НЕПРОНИЦАЕМЫХ ВКЛЮЧЕНИИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННО | JE |
| СОСТОЯНИЕ ПОРИСТОИ СРЕДЫ ПОД ДЕИСТВИЕМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА | |
| Н.А. Юдочкин, А.А. Таирова, Г.В. Беляков | .46 |
| ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЯЧИХ ИЗГИЬНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН | 40 |
| В.А. Калиниченко | .48 |

| ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА У ЗЕМЛИ В БАССЕЙНЕ НИЖНЕГО ДОНА ЗА ПЕРИОД 1966– 2020 ГГ |
|---|
| А.В. Парфенова, В.В. Кулыгин, А.Р. Иошпа |
| АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ БЕРИЛЛИЯ-7 В ПРИБРЕЖНОМ РАЙОНЕ ЮЖНОГО |
| ВЕРЕГА КРЫМА ЛЕТОМ 2010 Г. ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ |
| П.А. ЕВСТИГНЕЕВА, О.А. ДЫМОВа |
| ВИБРАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ СИММЕТРИЗАЦИИ ЛАМИНАРНОГО ГЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ДИФФУЗОРЕ |
| А.И. Федюшкин, А.А. Пунтус |
| ВЛИЯНИЕ ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИИ НА ГЕНЕРАЦИЮ ВЕРТИКАЛЬНОИ ТОНКОИ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ |
| Н.О. Анкудинов, А.А. Слепышев |
| ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ И БИОГЕОХИМИИ УСТОЙЧИВО |
| СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ВНУТРЕННЕГО ВОДОЕМА С ПРИМЕНЕНИЕМ |
| МОДИФИЦИРОВАННОГО ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА |
| Д.С. Гладских, Е.В. Мортиков |
| ПОГРЕШНОСТЬ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ, ВЫЗВАННАЯ |
| НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН |
| А.С. Запевалов |
| НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В КОЛЛЕКТОРАХ ПОЛЗЕМНЫХ ХРАНИЛИШ ГАЗА ПРИ ИХ |
| ЭКСПЛУАТАНИИ |
| ВИ Карев ЮФ Коваленко КБ Устинов 66 |
| РАСТЕКАНИЕ ПЯТЕН НЕФТЕПРОЛУКТОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЛЬЛА |
| А В Кистович |
| ΜΕΧΑΗИЗΜЫ ΠΡΟЯΒЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ В |
| МИКРОВОЛНОВОМ И ОПТИЧЕСКОМ ЛИАПАЗОНАХ |
| А В Мальанара С В Станиции и В В Билатор 72 |
| А.Б. Місдьедсьа, С.Б. Станичный, Б.Б. Булатов |
| |
| Π А. Назавара П. А. Назавар Н. А. Гоникор, А. А. Силикии 74 |
| OIEHKA BOSMOWHOCTH COSTAHIAG ABUALIMOHHOCO TASEPHOCO TOKATOPA SEPKATAHIJI |
| СПИКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ АВИАЦИОННОГО ЛАЗЕННОГО ЛОКАТОГА ЗЕГКАЛЬНЫК Е ПИКОР ОТ МОРСКОЙ ПОРЕРУПОСТИ С РЕЕРИОЙ ПИАГРАММОЙ ЦАПРАРЛЕНИОСТИ |
| |
| р и Иссар С Г. Иранар С Г. Истании Р. П. Радани Р.И. Тикании Т.Р. Глабара. 77 |
| D.11. ПОСОВ, С.1. ИВАНОВ, С.D. КАЛЕДИН, D.Д. ВОЛОДИ, D.11. ТИМОНИН, Т.В. ГЛЕООВА |
| ВОЗМОЖНОСТИ СУДОВОГО МАКЕТА АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ ПЕПРЕРЫВНОГО ПАЗЕВА ПО ВЕГИСТРАЦИИ ОПТИНЕСКИХ НЕОЛНОВОЛНОСТЕЙ ВЕЛИЗИ МОВСКОЙ |
| ЛАЗЕРА ПО РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ПЕОДПОРОДНОСТЕЙ ВЪЛИЗИ МОРСКОИ ПОРЕРУПОСТИ |
| DIL Hasan CE Margary DK Theorem TD Excercise 70 |
| В.Н. НОСОВ, С.І. ИВАНОВ, С.Б. КАЛЕДИН, В.И. ТИМОНИН, Т.В. ГЛЕООВА |
| пояс веронне: проявления эндогенных процессов на поверхности земли в |
| |
| А.А. Пасхина |
| ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКОВ ПЛОТНЫХ ВОД ПО МАТЕРИКОВОМУ СКЛОНУ ПРИ ИХ |
| ОБРАЗОВАНИИ В ПОЛЫНБЯХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА |
| П.Н. Головин, М.С. Молчанов |
| ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ОДНОМЕРНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ |
| ТЕРМИЧЕСКОИ СТРУКТУРЫ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ |
| Р.А. Ахтамьянов, Д.С. Гладских, Е.В. Мортиков, Н.В. Вазаева, Е.В. Татаринович |
| СОВМЕСТНЫИ КОСМИЧЕСКИИ И МОРСКОИ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕГИСТРАЦИИ СЛЕДА |
| НАДВОДНОГО СУДНА |
| В.Н. Носов, А.Н. Ядренцев, С.Г. Иванов, С.Б. Каледин, Т.В. Глебова, А.А. Шпаковский |
| ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНОГО ХРЕБТА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД |
| НАКЛОННЫМ ДНОМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО |
| ΕΕΤΑ-ЭΦΦΕΚΤΑ |
| Д.Н. Елкин, А.Г. Зацепин |
| ГЕНЕРАТОР УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА ДЛЯ БАКТЕРИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ ПАТОГЕНОВ В |
| ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ |

| М.А. Котов, Н.Г. Соловьев, А.Н. Шемякин, М.Ю. Якимов, О.В. Калмантаева, М.А. Макарова, |
|---|
| БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ VO ОБЛУЧЕНИЯ НА БИОПЛЕНКУ И СТРЕССОУСТОЙЧИВЫЕ |
| ΠΟΚΟΠΙΙΙΝΕCΗ ΦΟΡΜΗ Ρ ΔΕΡΙΙGΙΝΟSΔ |
| О.Ю. Манзенюк, М.А. Макарова, О.В. Калмантаева, В.В. Фирстова, М.А. Котов, А.Н. Шемякин. |
| М.Ю. Якимов, Н.Г. Соловьев |
| ОСОБЕННОСТИ РАСТЕКАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ |
| Т.О. Чаплина |
| ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ КОКСА-МАНКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ_ОТРАЖЕНИЯ |
| СОЛНЕЧНОГО СВЕТА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ |
| И.П. Шумейко, А.Ю. Абрамович105 |
| КАЙНОЗОЙСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАСТАНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ В |
| КОТЛОВИНЕ АМУНДСЕНА (ЕВРАЗИИСКИИ БАССЕИН, СЕВЕРНЫИ ЛЕДОВИТЫИ ОКЕАН) |
| А.А. Шрейдер, А.Э. Сажнева, А.Л. Бреховских, М.С. Клюев, И.Я. Ракитин |
| ПРИБРЕЖНЫЕ АПВЕЛЛИНГИ И ДАУНВЕЛЛИНГИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВИХРЕВОИ ДИНАМИКОИ |
| ВОД В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ |
| А.І. Заценин, О.И. Подымов |
| А И Феноникии А А. Гиеришер, А.С. Зауаров, А.Н. Роукков. 100 |
| НОВАЯ ВОЗРАСТНАЯ МОЛЕЛЬ НА ОСНОВЕ АКТИВНОСТИ ИЗБЫТОЧНОГО 210РВ |
| УЧИТЫВАЮЩАЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЛОННЫХ ОСАЛКОВ |
| Р.А. Лукманов, В.Ю. Русаков, А.С. Савин |
| О СВЯЗИ ТОНКОСТРУКТУРНОГО РАССЛОЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ С |
| ВЕРТИКАЛЬНЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ МАССООБМЕНОМ |
| В.В. Герасимов, А.Г. Зацепин |
| О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НА |
| ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ |
| ЯПОНСКОГО МОРЯ С.Ю. Касьянов117 |
| О ВОЛНОВОИ ДИНАМИКЕ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ |
| В.К. Казанков, С.И. Перегудин, С.Е. Холодова |
| ЭФФЕКТЫ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТОНКИМ ЦИЛИНДРОМ |
| А.Б. D азилевскии, А.П. РОЖКОВ |
| ЧИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИГОВАНИЕ ВЫПОСА ПЕСКА В ВЕГГИКАЛЬНО И ГОГИЗОПТАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИНАХ ПОЛЗЕМНЫХ ХРАНИЛИШ ГАЗА С ПОМОШЬЮ УСТАНОВКИ |
| ИСТИННО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ |
| Н.И. Шевнов, В.В. Химуля, С.О. Барков |
| ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ И СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ LVDT- |
| ДАТЧИКОВ НА ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ |
| НА УСТАНОВКЕ ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ ГТ1.3.9 |
| С.О. Барков, Н.И. Шевцов, В.В. Химуля124 |
| РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ЭФФЕКТИВНЫХ И ПОЛНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА |
| УСТАНОВКЕ ТРЕХОСНОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СЖАТИЯ ГТ1.3.9 |
| С.О. Барков |
| МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ НАГРЕВЕ КЕРОГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА |
| А.Н. Галыбин, С.Е. Якуш |
| ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКИММЕРОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ НЕФТЯНЫХ РАЗЛИВОВ С ВОДНОИ |
| ПОВЕРХНОСТИ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ |
| В.П. ПАХНЕНКО |
| РАЗГАВОТКА МОДЕЛИ СКИММЕГА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИИ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОЛУКТОВ С ПОВЕРУНОСТИ ВОЛЫ |
| ПЕФТЕНГОДУКТОВ С ПОВЕГАНОСТИ ВОДЫ |
| ИЛИ ПИЛИНИИ МОЛЕЛИРОВАНИЕ ШИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ЛЛЯ ОСВОЕНИЯ ТЕПЛА «СУХИХ» ГОРНЫХ |
| ПОРОД |
| В.Р. Ахмедзянов, Е.Л. Прикащикова |
| ПЕРСПЕКТИВЫ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РОССИИ: РАСЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ЗАТРАТ |
| Дегтярев К.С., Березкин М.Ю., Показеев К.В., Соловьев Д.А |
| |

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ И ЦИРКУЛЯЦИЮ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ...... РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ОКЕАНОГРАФИИ НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ СКВАЖИН В КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА..... РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЯХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ПОВЕРХНОСТИ..... К.Н. Захаров, Ю.Ю. Плаксина, А.В. Пуштаев, Ю.К. Руденко, Н.А. Винниченко, А.В Уваров......154 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ КАМЕННОЙ СОЛИ ПО ВЫСОТЕ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ-ЕМКОСТИ..... ON STABILITY OF INVERSE PROBLEM SOLUTION FOR ROCK MASS STRESS STATE RECONSTRUCTION BASED ON NATURAL FRACTURES ANALYSIS..... АНАЛИЗ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ДЕФЕКТА ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАГАНА ИРМА..... ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ АНДЕЗИБАЗАЛЬТОВ В УСЛОВИЯХ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ..... УПРУГОПЛАСТИЧЕКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ..... ТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ..... М.С. Муллакаев, Р.М. Муллакаев, Д.Г. Сарваров, А.А. Рухман.....177 ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА СКВАЖИНАХ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)..... RESEARCH ON THE INFLUENCE OF EM METHODS ON THE VISCOSITY OF A MIXTURE OF SULFUR AND HIGH-SULFUR PARAFFINIC OILS.....



MATHEMATICAL MODELING OF FALLING ROCKS USING OPENFOAM M.S. Bezuglov, N.S. Orlova

North Ossetian State University named by K.L. Khetagurova, Vladikavkaz, Russia

<u>norlova.umi.vnc@gmail.com</u>

Currently, there are quite a lot of software packages for modeling inclined processes [1,2]. There are also cases where ready-made application software packages were used, including built-in solvers [3-6]. For example, such freely distributed packages are known as LIGGGHTS (LAMMPS improved for general granular and granular heat transfer simulations) [3], YADE (Yet Another Discrete Element) [4], OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) [5-7]. ANSYS should be noted among the commercial packages. Similar models are implemented in the solvers of this package.

We used a free open source software for computational fluid dynamics (CFD) OpenFOAM (Open Source Field Operation And Manipulation CFD ToolBox) [5-7]. The solver twoPhaseEulerFoam of OpenFOAM was used to simulate the falling rock. Below is a brief description of the rockfall project in OpenFOAM.

The "rockfall" directory contains three main folders: "0", "constant" and "system". The "0" folder contains files that describe the initial and boundary conditions for the variables alpha (particle volume fraction), Ua (solid phase velocity), Ub (gas phase velocity), P (gas phase pressure) and Theta (granular temperature). A mathematical representation of the initial and boundary conditions is presented in [5-7].

The "constant" folder contains files describing the geometry of the problem and the properties of the two phases. The geometry of the region and the computational mesh are constructed using the blockMesh utility, which allows reseachers to build structured block meshes. All geometric configurations are produced in three dimensions. The formulation and solution of the problem in the OpenFOAM package is carried out in dimensional variables. The computational mesh configuration is specified in the blockMeshDict. At the beginning of the file, a list of vertices is compiled, then the constituent blocks of the computational mesh of the problem are written down (in our case there are two of them). Next, the boundaries are specified. Figure 1 shows the computational domain of the problem.



Figure 1. Computational domain of the problem

The "system" folder contains configuration files that describe the settings of the solver and utilities used to solve the problem.

Figure 2 shows an example of modeling of rock collapse for the case where the slope angle is 37 degrees, the height of the slope is 30 m. The average diameter of rocks is 5 mm. To visualize the calculation results, we used free software ParaView. The calculation conditions are given in more detail in [7].



Figure 2. The visualization of modeling results

In conclusion, OpenFOAM allows researchers to change solvers (improve mathematical models) and create their own solvers.

Благодарности/Acknowledgments:

This study was funded by Russian Science Foundation, project number 23-27-00264, https://rscf.ru/en/project/23-27-00264/.

Литература/References:

1. Dorren, L., Berger, F., Bourrier, F., Eckert, N., Saroglou, C., Schwarz, M., Stoffel, M., Trappmann, D., Utelli, H.-H., Moos, C. Delimiting rockfall runout zones using reach probability values simulated with a Monte-Carlo based 3D trajectory model // Natural Hazards and Earth System Sciences. Discussions. Preprint. https://doi.org/10.5194/nhess-2022-32.

2. Mitchell, A., Zubrycky, S., McDougall, S., Aaron, J., Jacquemart, M., Hübl, J., Kaitna, R., Graf, C. Variable hydrograph inputs for a numerical debris-flow runout model // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2022. No. 22. P. 1627-1654.

3. Orlova, N. S., Volik, M.V. Study of Falling Rocks Using Discrete Element Method // Processes in GeoMedia. Springer Geology. 2020. V. 1. P. 75-82. DOI: 10.1007/978-3-030-38177-6 9.

4. Albaba, A., Schwarz, M., Wendele, r C., Loup, B., Dorren, L. Elasto-plastic-adhesive DEM model for simulating hillslope debris flows: cross comparison with field experiments // Natural Hazards and Earth system Sciences. No 19 (11). P. 2339–2358. https://doi.org/10.5194/nhess-19-2339-2019.

5. Orlova, N. Investigation of the influence of restitution coefficient on the results of the rockfall modeling // Processes in geo-environments. № 3, 2018. P. 1037 - 1041.

6. Orlova, N., Kamenetskii, E. Verification of rock falls model using the continuum approach // Sustainable Development of Mountain Territories. № 1, 2018. P. 7 - 13.

7. Orlova, N., Volik, M. Mathematical modeling of the motion of rockfall using the continuum approach // Proceedings of the universities. North Caucasus region. Natural Sciences. N_{2} 3, 2016. P. 20 – 24.

CT-BASED COMPUTATIONAL PORE-SCALE ANALYSIS OF PERMEABILITY AND PORE SPACE GEOMETRY IN GAS CONDENSATE RESERVOIR ROCKS V.V. Khimulia

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow, Russia valery.khim@gmail.com

The Arctic shelf is a huge treasure trove of hydrocarbons: oil and gas deposits already explored account for a quarter of the world's reserves. However, the development of the Arctic region is currently facing significant challenges. These challenges primarily stem from the complexities associated with field development and operations in the demanding offshore conditions, coupled with the elevated economic costs linked to conventional development approaches. This difficulty is particularly prominent in the case of gas and gas condensate reservoirs found in the

Russian Arctic shelf. Successfully developing and exploiting such reservoirs necessitates thorough and multifaceted preliminary investigations of core materials.

Comprehending the physical properties of reservoir rocks plays a pivotal role in the development of reservoir models, the prediction of well performance, and the innovation of strategies to enhance well productivity. The primary reservoir characteristics that significantly impact reservoir processes include porosity, permeability, matrix structure, and rock pore space. Traditionally, the assessment of rock permeability and porosity involved laboratory tests, well logging procedures, or indirect inferences through correlations with other rock attributes [1]. However, a relatively recent and promising approach to studying rock properties in the laboratory is the numerical simulation of filtration processes using structures obtained through microcomputed X-ray tomography (CT).

X-ray computed tomography represents a significant non-destructive technique for inspecting the internal structure of rocks, providing a valuable complement to direct laboratory investigations. The result of a CT examination is presented as a series of grayscale images, collectively forming a three-dimensional depiction of X-ray absorption within the examined specimen [2]. One of the significant advantages of methods based on tomography data is the possibility of detailed analysis of pore space, including its connectivity, tortuosity of filtration paths, pore volume distribution, etc. Structural analysis of pore space allows quantitative assessment of the causes of anisotropy of filtration properties, which is a tremendous advantage compared to other methods of materials analysis.

This work presents the results of rock structure digital studies carried out on the base of ProCon X-Ray CT-MINI high-resolution scanner of the Institute for Problems in Mechanics RAS. On the basis of tomography images 3D structures of the studied rocks were created. Numerical quantitative analysis of pore distribution in the rock was carried out, pore space connectivity and pore distribution in rock slices were investigated. Images of percolation paths were obtained and the tortuosity of filtration paths in the rock was estimated. Numerical modeling of the filtration process was carried out, permeability values of rocks in three directions were obtained. The data necessary for filling the hydrodynamic model of the field, as well as for a better understanding of the fundamentals of the relationship between the filtration process and the structure of the pore space in rocks were obtained. It is shown that the data obtained by modeling on high-resolution images closely correlate with laboratory measured permeability values.

The core material under investigation originated from a gas condensate field located on the Arctic shelf of Russia. These examined rocks were characterized by their highly porous and fragile sandstone composition, displaying low levels of strength and cementation. A series of high-resolution tomographic images were taken to obtain a clear picture of the internal structure. The orientation of the axes in the specimens corresponded to the rock layering axes.

The procedure for computed tomography and image acquisition of the specimens was carried out using the ProCon X-Ray CT-MINI high-resolution micro-CT scanner of the Institute for Problems in Mechanics RAS [3]. The microfocus X-ray tube, known for its high resolution and closed-loop operation, offers an adjustable output voltage range from 20 kV to 90 kV and an adjustable current range from 10 μ A to 160 μ A. The tube's maximum output power reaches 8 W, with the smallest focal spot size measuring 5 μ m. The X-ray detector, characterized by high sensitivity and minimal noise, features a pixel count of 2940 x 2304 and a pixel size of 49.5 μ m. The active (sensitive) area of the detector spans 146 x 114 mm. The scans were reconstructed using VGSTUDIO software, while 3D image processing was carried out using Geodict Math2Market GmbH software [4]. To evaluate the geometric and statistical homogeneity of the pore space across all specimens, we conducted porometric analysis and visualized pore geometry using MatDict [5] and the PoroDict modules, both of which are based on segmented images.

High-resolution computed tomography images were taken of all specimens. These images offer clear differentiation between grain and pore boundaries, enabling statistical quantitative analysis and modeling. All high-resolution imaging was conducted with the following parameters: a source voltage of 90 kV, an amperage of 89 μ A, an exposure time of 0.2 s, 15 averages, a rotation step of 0.125 degrees, and a voxel size of 4.957 μ m. Figure 1(a) displays the high-resolution projection obtained after reconstruction. For segmentation purposes, the Global Thresholding method was employed to refine the grain boundaries, as illustrated in figure 1(b).



Figure 1. a – slice of high-resolution 3D image after reconstruction; b – same slice after segmentation (grey – matrix material, black – pores)

The structures used for the analysis had linear sizes of 500 voxels. Open porosity was estimated for all specimens using PoroDict module. Further results of the study will be presented using a typical specimen with porosity of 0.339. Figure 2a shows the full 3D structure of the described specimen after processing and segmentation. Figure 2b shows the rock matrix obtained after segmentation. Figure 2c shows the pore space structure of the specimen. Figure 2c visually shows that the pore space of the specimen is highly cohesive and dense.



Figure 2. a - full 3D structure of the described specimen after processing and segmentation (grey – matrix material, black – pores); b - rock matrix obtained after segmentation; c - pore space structure of the specimen

Laboratory measurements of rock gas permeability were performed to determine the filtration properties of the specimen and to compare with the results obtained by digital method. The results of permeability measurements along and across the bedding for the described core interval are presented in Table 1, column 3. As can be seen from the table, the rock has high permeability values. To evaluate the filtration properties and their anisotropy, we conducted a filtration flow modeling procedure. To simulate the filtration flow within the resulting structure, we employed the Navier-Stokes filtration model using the FlowDict module [6]. The results of the simulation on the example of the described specimen are presented in Table 1, column 4. As evident from the table, the computed permeability closely aligns with the laboratory data. The permeability differs insignificantly in the directions along and across the bedding, which indicates a weak degree of transversal anisotropy of the rock in terms of filtration properties.

Geodesic tortuosity values were measured for each direction in the specimen. Tortuosity is defined as the average over all shortest path lengths divided by the thickness of the material [7]. The results of this analysis are presented in column 5 of Table 1. Comparison of the results on three axes shows that the

values differ insignificantly. This is evidence of high connectivity of the pore space on all axes. It can be seen that the value of tortuosity perpendicular to the bedding plane has a lower value. As a consequence, the permeability along this direction is lower than in other directions. Thus, it is confirmed that tortuosity can be used in comparative assessment of rock filtration properties. The accuracy of this assessment will depend on the range of permeability values being compared.

| Direction in rock | Specimen axis | Laboratory value of permeability, D | Calculated permeability, D | Mean geodesic tortuosity | Minimal pore volume fraction |
|---------------------------|------------------|---|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| Across the bedding (X) | Х | 5.200 | 5.455 | 1.05922 | 0.088 |
| Along the bedding | Y | 5 500 | 5.820 | 1.05640 | 0.118 |
| (Y-Z) | Ζ | 5.500 | 5.516 | 1.05651 | 0.110 |

Table 1. Results of measurements and digital analysis

To integrally evaluate the pore distribution along each axis of the specimen, 2D Density maps were made. Such distributions are created based on the calculation of the distribution of Pore Volume Fraction in a plane normal to the chosen direction. Each pixel in this plane is calculated by averaging the respective property in the direction of interest at this position. Figure 3 shows the integral porosity distributions along each axis of the specimen. The axes of each graph show the specimen lengths in mm along the directions perpendicular to the one under consideration. The color indicates the average porosity values of all pixels along the selected specimen direction.



Figure 3. Distribution of pore volume fraction along the X-direction (a), Y-direction (b) and Z-direction (c)

As can be seen from these maps, the porosity distribution along each direction is generally uniform. The low porosity (blue) and high porosity (red) regions are homogeneously distributed. Meanwhile, it can be seen from Fig. 4b that along the Y direction of the specimen, the highest porosity is slightly concentrated in the right part of the specimen (end of the X axis). This may be the reason for the increased permeability along this direction. Along the Z direction of the specimen (Fig. 3c), this pore cluster appears to a lesser degree, which also affects the lower permeability value along the Z axis than along the Y axis. The minimum values of pore volume fraction (porosity) in each direction are presented in column 6 of Table 1. This method allows us to evaluate the different contribution of porosity to the distribution of filtration fluxes in the presence of a cohesive pore space.

The data acquired in this study represent the initial phase of our planned comprehensive examination of the rocks in this deposit. The study reveals that the filtration properties of the rock are nearly isotropic, displaying only weak transverse anisotropy. The study concludes that the causes of permeability anisotropy are a combination of pore space characteristics, such as varying channel tortuosity along different directions within the rock, differences in percolation path widths, local porosity fluctuations across specimen slices, and non-uniform distribution of pore space connectivity. The data obtained from this study are essential for developing the hydrodynamic model of the gas field. They also provide a deeper understanding of the relationship between the filtration process and the structure of pore space in rocks. The digital investigations conducted in this study are an invaluable tool for examining the internal structure of rocks and significantly complement and expand the range of results obtained through traditional laboratory methods.

Благодарности/Acknowledgments:

The research was supported by the Russian Science Foundation grant № 23-77-01037, https://rscf.ru/project/23-77-01037/.

Литература/References:

- 1. Ivanov M.K. et al. 2008. Petrophysical Methods for Study of Core Material. M.: Publishing house of Moscow State University. P. 112. (in Russian).
- Lichun J., Mian C. 2014. 3D imaging of fractures in carbonate rocks using X-ray computed tomography technology. Carbonates and Evaporites. V. 29. I. 2. pp. 147-153. https://doi.org/10.1007/s13146-013-0179-9.
- 3. CT-MINI by ProCon X-Ray GmbH available at https://procon-x-ray.de/en/ct-mini.
- 4. GeoDict The Digital Material Laboratory: [digital source] URL: https://www.math2market.de/ (Date of request: 23.09.2023).
- 5. Rief S., Hilden J., Planas B. MATDICT User Guide. GeoDict release 2022. December 8, 2021. https://doi.org/10.30423/userguide.geodict2022-matdict.
- 6. Hilden J., Cheng L., Linden S., Planas B. FlowDict User Guide GeoDict release 2022. Published: November 9, 2021. https://doi.org/10.30423/userguide.geodict2022-flowdict.
- Stenzel O., Pecho O., Holzer L., Neumann M., & Schmidt V. 2016. Predicting effective conductivities based on geometric microstructure characteristics. AIChE Journal. 62(5). pp. 1834-1843. https://doi.org/10.1002/aic.15160.

THE STUDY OF THE ROLE OF METASTABLE NITROGEN IN MOLECULAR KINETICS OF TITAN'S MIDDLE ATMOSPHERE

A.S. Kirillov

Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk region, Russia <u>kirillov@pgia.ru</u>

The quenching rate coefficients of electronically excited N₂ molecules by N₂, CO molecules have been calculated in [1-4] using Landau-Zener and Rosen-Zener approximations. It has been shown that the dominant channels for the quenching of metastable nitrogen N₂($A^{3}\Sigma_{u}^{+}$) and electronically excited N₂($C^{3}\Pi_{u}$) by N₂, CO molecules are intermolecular processes with the excitation of target molecules [3,4]

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, v \ge 2) + N_2(X^1\Sigma_g^+, v = 0) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+, v \ge 0) + N_2(A^3\Sigma_u^+, v^*),$$

$$N_2(A^3\Sigma_u^+, v \ge 0) + CO(X^1\Sigma_g^+, v = 0) \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+, v \ge 0) + CO(A^3\Sigma_u^+, v^*).$$

$$\begin{split} N_2(A^3\Sigma_u^+, v\geq 0) + CO(X^2\Sigma_g^-, v=0) &\rightarrow N_2(X^2\Sigma_g^-, v\geq 0) + V_2(C^3\Pi_u, v\geq 0) + N_2(X^1\Sigma_g^+, v=0) &\rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+, v\geq 0) + N_2(C^3\Pi_u, v^*) \,. \end{split}$$

The calculated coefficients are used in calculating the relative populations of $N_2(A^3\Sigma_u^+, v \ge 0)$ at the altitudes of the middle atmospheres of Titan (the mixture of N_2 , CH₄, H₂, CO gases).

We study the electronic kinetics of molecular nitrogen in the middle atmosphere of Titan during precipitations of high-energetic particles. Cosmic rays having very high power penetrate deep into the Titan's atmosphere in comparison with solar photons and electrons from Saturn's magnetosphere. Therefore, galactic cosmic rays are the source of ionization of the atmosphere at lower altitudes and produce fluxes of secondary electrons in the ionization processes. Moreover, produced secondary electrons interact with atmospheric molecular nitrogen exciting different triplet electronic states of N_2 molecules.

We consider here the excitation of five triplet electronic states

$$e + N_{2}(X^{1}\Sigma_{g}^{+}, v=0) \rightarrow N_{2}(A^{3}\Sigma_{u}^{+}, v'=0.29) + e \rightarrow N_{2}(B^{3}\Pi_{g}, v'=0.12) + e \rightarrow N_{2}(W^{3}\Delta_{u}, v'=0.21) + e \rightarrow N_{2}(B^{'3}\Sigma_{u}^{-}, v'=0.15) + e \rightarrow N_{2}(C^{3}\Pi_{u}, v'=0.4) + e$$

in the collisions of $N_2(X^1\Sigma_g^+, v=0)$ with high-energetic secondary electrons produced in the middle atmosphere of Titan during cosmic ray precipitation. The electronically excited triplet nitrogen molecules radiate the bands of Vegard-Kaplan (VK), First Positive (1PG), Wu-Benesch (WB), Infrared Afterglow (IRAG), Second Positive (2PG) systems:

 $\begin{array}{l} N_2(A^3\Sigma_u^+,\nu') \to N_2(X^{1}\Sigma_g^+,\nu'') + h\nu_{VK} \ , \\ N_2(B^3\Pi_g,\nu') \leftrightarrow N_2(A^3\Sigma_u^+,\nu'') + h\nu_{1PG} \ , \\ N_2(W^3\Delta_u,\nu') \leftrightarrow N_2(B^3\Pi_g,\nu'') + h\nu_{WB} \ , \\ N_2(B^{\prime3}\Sigma_u^-,\nu') \leftrightarrow N_2(B^3\Pi_g,\nu'') + h\nu_{IRAG} \ , \\ N_2(C^3\Pi_u,\nu') \to N_2(B^3\Pi_g,\nu'') + h\nu_{2PG} \ . \end{array}$

The radiational transitions influence on vibrational populations of the triplet states.

For conditions of high pressure at the altitudes of the middle Titan's atmosphere it is necessary to include processes of the electronic quenching of all triplet states in molecular collisions. In the case of the triplet states of molecular nitrogen we consider the following intramolecular processes:

$$N_2(Y,v') + N_2 \rightarrow N_2(B^3\Pi_g,v'') + N_2$$
,
 $N_2(B^3\Pi_g,v') + N_2 \rightarrow N_2(Y;v'') + N_2$

with $Y = A^{3}\Sigma_{u}^{+}$, $W^{3}\Delta_{u}$, $B^{\prime 3}\Sigma_{u}^{-}$ and intermolecular processes: $N_{2}(Y, v') + N_{2}(X^{1}\Sigma_{\sigma}^{+}, v=0) \rightarrow N_{2}(X^{1}\Sigma_{\sigma}^{+}, v^{*}>0) + N_{2}(Z B^{3}\Pi_{\sigma} \cdot v'')$

$$\begin{split} & N_2(R, \mathcal{I}_g, \mathcal{V}) + N_2(R, \mathcal{I}_g, \mathcal{V}_g) + N_2(R, \mathcal{I}_g, \mathcal{V}_g) + N_2(\mathcal{I}, \mathcal{I}_g, \mathcal{V}) + N_2(\mathcal{I}_g, \mathcal{V}_g) + N_2($$

with *Y* and $Z = A^{3}\Sigma_{u}^{+}$, $W^{3}\Delta_{u}$, $B^{\prime 3}\Sigma_{u}^{-}$ for the inelastic collisions with N₂ molecules.

The profile of N_2 ion production rates at the altitudes of 50-250 km of the Titan's middle atmosphere during the precipitation of cosmic rays is taken according to Vuitton et al. [5]. Vibrational populations of the $A^3\Sigma_u^+$ state of N_2 at the altitudes 70 and 250 km are shown in figure 1. Also the contributions of direct excitation of all triplet states in the vibrational populations are here presented.



Figure 1. Vibrational populations of the $A^3 \Sigma_u^+$ state of N_2 at the altitudes 70 and 250 km (solid lines). Contributions of direct excitation of the $A^3 \Sigma_u^+$ state are shown as dashed lines

We will consider here the influence of the interaction of electronically excited nitrogen molecules with acetylene and ethylene molecules on the dissociation of the target molecules and the production of the C₂H and C₂H₃ radicals. Umemoto [6] has evaluated production yield of H atoms in the reactions of the N₂(A³Σ_u⁺) metastable nitrogen with C₂H₂ and C₂H₄ molecules. He has received that the H-atom yields in the inelastic collisions are 0.52 and 0.30, respectively. It can be assumed that the main component in the active medium of Umemoto's experiment was N₂(A³Σ_u⁺,ν'~0) molecules, since collisional processes could lead to the accumulation of excitation energy at lowest vibrational levels.

We believe in our calculation that the main production channels of the H atoms are the reactions

$$N_2(A^3\Sigma_u^+) + C_2H_2 \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+) + C_2H + H$$
, products, (1a)

$$N_2(A^3\Sigma_u^+) + C_2H_4 \rightarrow N_2(X^1\Sigma_g^+) + C_2H_3 + H$$
, products. (1b)

The results of the calculation for the profiles of production rates of the C₂H and C₂H₃ radicals are shown in Figs.2 and 3. We assumed in our calculations that acetylene and ethylene concentrations are related with N₂ concentrations by the ratios $[C_2H_2]=4\cdot10^{-6}\cdot[N_2]$ and $[C_2H_4]=1.5\cdot10^{-7}\cdot[N_2]$ according to Vuitton et al. [5]. It should be noted that at the concentrations of acetylene the rates of the interaction of N₂(A³Σ_u⁺,v'=0,1) with C₂H₂ molecules are comparable with the rates of the interaction with N₂, CH₄, CO.



Figure 2. The calculated C₂H and H production rates at the altitudes 50-250 km: processes (1a) and (2a) are shown as solid and dashed lines, respectively

The results of the influence of electronically excited N_2 on the C_2H and C_2H_3 production are compared with the production rates in the dissociation by secondary electrons

$$e + C_2H_2 \rightarrow C_2H + H + e$$
, (2a)
 $e + C_2H_4 \rightarrow C_2H_3 + H + e$. (2b)

The comparison of contribution rates in Figs.2 and 3 shows the domination of the reactions (1a) and (1b) in the productions of the C_2H and C_2H_3 radicals. It is seen that the contributions of the processes (1a) and (1b) in the productions of the C_2H and C_2H_3 radicals exceed on few orders of magnitudes than the contributions of the processes (2a) and (2b). Therefore, the processes (1a) and (1b) have to be taken into account in a study of chemical kinetics in the Titan's middle atmosphere.



Figure 3. The calculated C_2H_3 and H production rates at the altitudes 50-250 km: processes (1b) and (2b) are shown as solid and dashed lines, respectively

Литература/References:

1. Kirillov, A.S., 2004. Application of Landau-Zener and Rosen-Zener approximations to calculate rates of electron energy transfer processes. Advances in Space Research, 33: 993-997.

2. Kirillov, A.S., 2008. Electronically excited molecular nitrogen and molecular oxygen in the highlatitude upper atmosphere. Annales Geophysicae, 26: 1159-1169.

3. Kirillov A.S., 2016. Intermolecular electron energy transfer processes in the collisions of $N_2(A^3\Sigma_u^+,v=0-10)$ with CO and N_2 molecules. Chemical Physics Letters, 643: 131-136.

4. Kirillov, A.S., 2019. Intermolecular electron energy transfer processes in the quenching of $N_2(C^3\Pi_u, v=0-4)$ by collisions with N_2 molecules. Chemical Physics Letters, 715: 263-267.

5. Vuitton, V., Yelle, R.V., Klippenstein, S.J. et al., 2019. Simulating the density of organic species in the atmosphere of Titan with a coupled ion-neutral photochemical model. Icarus, 324: 120-197.

6. Umemoto, H., 2007. Production yields of H(D) atoms in the reactions of $N_2(A^3\Sigma_u^+)$ with C_2H_2 , C_2H_4 , and their deuterated variants. Journal of Chemical Physics, 127: 014304.

DIGITAL STUDY OF STRUCTURAL, FILTRATION AND CAPACITIVE PROPERTIES OF RESERVOIR ROCKS OF GAS-CONDENSATE FIELDS ON CT-BASED METHODS V.V. Khimulia, S.O. Barkov, N.I. Shevtsov

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow, Russia

valery.khim@gmail.com

Nowadays, more than 20 fields have been discovered within the Arctic shelf of the Russian Federation, most of which are classified as unique and large fields according to the current classification. These fields are a key prospect for expanding the nation's resource base. However, development of the Arctic is currently extremely low. This is due to the significant complexity of field development and operation in shelf conditions, as well as increased economic costs when applying traditional development methods. This is especially true for the reservoirs of gas and gas condensate fields on the Russian Arctic shelf, which are represented by weakly cemented, highly permeable sandstones with low strength characteristics. Development and exploitation of fields with such reservoirs requires comprehensive and versatile preliminary studies of core material to create the most accurate geomechanical and hydrodynamic models and to prevent the development of negative processes in wells, such as sanding, stability loss, and permeability reduction in the bottomhole zone.

X-ray computed tomography (CT) methods are one of the new and promising areas of research of reservoir properties. Together with numerical modeling methods, they can significantly supplement the results of laboratory and in-situ tests. In addition, CT methods are non-destructive, which allows combining such studies with any direct methods of research, and becomes especially relevant in conditions of limited amount of core material. X-ray radiation when passing through the rock loses power in proportion to its density and is registered by the receiver matrix, forming a pixel image. The scanning results generate a large amount of data, including thousands of projections of the studied sample, which are further reconstructed into its three-dimensional model. Tomography of core material allows to study in detail the geometry of rock void space (pores, caverns, fractures) [1]. Application of modern software and the latest approaches of numerical simulation allows to calculate permeability and visualize filtration flows on three-dimensional rock structures [2].

This paper presents the results of tomographic studies of the internal rock structure of the productive reservoir of a gas condensate field on the northern shelf of Russia. Digital studies of filtration and capacitance properties, fractional composition of the rock matrix are described. The studies included analysis of heterogeneities, cavernosity, initial fracture formation, digital porometry, granulometry of the rock matrix, and computer modeling of filtration processes.

The studied rocks were highly porous friable sandstones with low strength and cementation. Cubeshaped specimens with 40 mm facets were made from the cores. Computed tomography images were taken at two scales: full-scale imaging of the specimens to obtain a complete picture of the internal structure, and high-resolution imaging of individual geomaterial parts for digital analysis.

The ProCon X-Ray CT-MINI high-resolution CT scanner [3] of the Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS (IPMech RAS) was used to carry out computed tomography and obtain images of the specimens. The high resolution, micro-focus, closed-loop X-ray tube has an adjustable output voltage range from 20 kV to 90 kV and an adjustable current range from 10 μ A to 160 μ A. The maximum output power of the tube is 8 W. The high sensitivity, low noise X-ray detector has a pixel count of 2940 x 2304 and a pixel size of 49.5 μ m. The resulting projection set is then mathematically processed (reconstructed) by the operator using the specialized VGSTUDIO software. The reconstructed dataset is loaded into the specialized software Geodict, which allows multiscale processing of 3D images, modeling, visualization and determination of material properties.

Large-scale images allow to cover a large amount of material for analysis, but reduce the available imaging resolution. Scanning parameters for cube specimens were next: source voltage was 90 kV, amperage was 89 μ A, exposition time was 0.28 s, number of averages was 3, rotation step was 0.125 degree and the voxel size was 22.326 μ m. Figure 1a shows the lateral projection of one of the specimens after reconstruction. For all specimens, the initial structure of the interior space was homogeneous. Caverns and fracturing are absent. Impurities of denser material as well as traces of metals are found throughout the volume. The total volume of impurities is not more than 1%. There are no clear areas of layering, but traces of fluid movement in the reservoir in the form of directional impurities are recognizable. The angle of their inclination varies from 0 to 18 degrees.



Figure 1. a – side projection of one of the samples after reconstruction (gray and white – material, black - air); b – slice of high-resolution 3D image after reconstruction; c – same slice after NLM filtering

All high-resolution imaging was performed with the next parameters: source voltage was 90 kV, amperage was 89 μ A, exposition time was 0.2 s, number of averages was 15, rotation step was 0.125 degree and the voxel size was 4.957 μ m. After scanning and reconstruction, the detailed work with images was carried out in the GeoDict software. The Non Local Means (NLM) filter was used to smooth the image and simplify the segmentation procedure. Fig. 1b shows a part of the projection obtained in high resolution after reconstruction, and Fig. 1c shows the same region after processing. Segmentation was performed using the Global Tresholding method to refine the grain boundaries [4]. The structures were represented as a cube with an edge of 500 voxels.

Porometry and granulometry analyses were performed using PoroDict and MatDict modules to quantitatively study the pore space and structure of the rock matrix. With their help, statistical distribution of pores and rock granules by their characteristic sizes was obtained. The final diagrams of the dependence of the volume fraction of each size fraction on the diameter of pores/granules on the example of one of the specimens are presented in Figure 2.





The graphs show that the size distribution of matrix grains is uniform. Large silty (large sized aleurite 0.1-0.05 mm) particles predominate in the matrix composition. Their content for the described specimen is 55.4%. The content of fine sandy fractions (powdery 0.25-0.1 mm) is 24%. The pore size distribution has two expressed maxima at 20-30 μ m and 35-45 μ m. For pores larger than 50 μ m, an increase in size is accompanied by a uniform decrease in number. The open porosity of the described specimen was 33.8%. On average, the porosity of the described series of specimens varied between 29-34%. The number of closed pores is not more than 0.05%, which indicates a high cohesion of the pore space.

In order to evaluate the filtration properties and their anisotropy, a modeling of the filtration flow was carried out. Before that, the permeability of the rocks was measured by laboratory methods. To simulate filtration flow through the resulting structure using the FlowDict module, two filtration models were used: Stokes and Navier-Stokes [25]. To recreate the conditions of laboratory permeability measurement the following flow parameters were chosen: fluid - air, pressure drop 0.1 bar, temperature 20°C, boundary conditions in the filtration direction - periodic with implicit region 10 voxels, in the tangential direction - symmetric. LIR solver with the termination criterion error bound 0.1 was used for calculations. A pressure drop of 100 Pa was used in the linear Stokes model to meet the laminar conditions.



Figure 3. a - velocity field by Stokes model; b - velocity field by Navier-Stokes model

Figure 3 shows the flow velocity fields along the bedding for both models. For both models, a uniform distribution of main flows over the specimen volume is observed. The filtration channels are wide, and the change in size is smooth along the entire structure. The table 1 presents the results of laboratory permeability measurements for the studied interval along the two directions in the rock, as well as the calculated permeability values for both models.

| Filtration model / measurement | Permeability across the bedding, D | Permeability along the bedding, D | |
|--------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-------|
| Laboratory value | 5.200 | 5.500 | |
| Stokes | 6.883 | 7.489 | 7.019 |
| Navier-Stokes | 5.455 | 5.820 | 5.516 |

Table 1. Results of measurements and simulation of filtration flow.

As can be seen from the table, the permeability calculated by both models is in good agreement with the laboratory data. The permeability along the core axis for both models also remains lower than in the layering directions, which indicates a weak degree of transversal anisotropy. At the same time, the values obtained within the Navier-Stokes model correlate more closely with the laboratory data due to the greater complexity of the model and its applicability to higher velocity flows.

The data obtained in this work are the first stage of the planned comprehensive studies of the rocks of this deposit. The non-destructive methods described in this work allow to simplify the data acquisition on core material characteristics. Application of the obtained results in combination with geomechanical tests of rocks is intended to expand the existing approaches to complex analysis of core material of gas and gas condensate reservoirs, as well as to complement and clarify the mathematical and operational models of the studied objects.

Благодарности/Acknowledgments:

The research was supported by the Russian Science Foundation grant № 23-77-01037, *https://rscf.ru/project/23-77-01037/.*

Литература/References:

1. Efimov A.A., Savitsky Y.V., Galkin S.V., & Shapiro S. 2016. Experience in the study of carbonate sediment cores by X-ray tomography. Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Geology. Oil and Gas and Mining, 15(18), 23-32.

2. Khimulia V.V., & Barkov S.O. 2022. Analysis of changes in the internal structure of lowpermeability reservoir rocks by means of computed tomography when implementing the directional unloading method. Actual problems of oil and gas, (4 (39)), 27-42.

3. CT-MINI by ProCon X-Ray GmbH available at https://procon-x-ray.de/en/ct-mini.

4. GeoDict - The Digital Material Laboratory: [digital resource] URL: https://www.math2market.de/ (Date of access: 13.09.2023).

5. Guizard N., Nakamura K., Coupé P., Fonov V. S., Arnold D. L., & Collins D. L. 2015. Non-local means inpainting of MS lesions in longitudinal image processing. Frontiers in neuroscience, 9, 456.

GEOPHYSICAL EFFECTS OF A FIRE IN THE MEGA-KHIMKI S.A. Riabova^{1,2}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia viabovage mail m

<u>riabovasa@mail.ru</u>

The constant increase in the number and size of large urban agglomerations, as well as the increase in the rate of industrialization of modern society, leads to a significant increase in man-made influence on the environment, which in turn increases the risks of man-made phenomena of a catastrophic nature, among which large fires occupy one of the first places, arising in enterprises of various profiles and in residential areas.

Geophysical monitoring, based on recording and analysis of disturbances in physical fields in the environment, should be considered as one of the methods for monitoring fires. In this case, data obtained as a result of instrumental observations acquire particular importance.

This research examines the geophysical effect of a fire in the Mega-Khimki shopping center that occurred on December 9, 2022 in Moscow. The fire started at ~2:50 UT and was extinguished at ~15:00 UT. The most intense burning was observed in the period 9:00–13:00 UT over an area of ~18,000 m².

Благодарности/Acknowledgments:

The research was carried out as part of the state task of the IDG RAS (No. 1220329000185-5 "Manifestation of processes of natural and technogenic origin in geophysical fields") and within the framework of the state task of the IPE RAS.

VARIATIONS IN THE ELECTRIC FIELD IN THE SURFACE LAYER OF THE ATMOSPHERE DURING THE MAGNETIC STORM ON APRIL 23-24, 2023 ACCORDING TO DATA FROM MID-LATITUDE OBSERVATORIES S.A. Riabova^{1,2}, K.N. Pustovalov^{3,4}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ³Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the RAS, Tomsk, Russia ⁴National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

riabovasa@mail.ru

The possible response of the electric field in the surface layer of the atmosphere to the magnetic storm of April 23-24, 2023 is analyzed. The magnetic storm with intensity G4 on the NOAA scale was caused by a powerful solar flare with intensity M1.7, which was observed on April 21, 2023, and became the most powerful in the current cycle of solar activity.

We used data from instrumental observations of variations in the vertical component of the electric field at the Mikhnevo Geophysical Observatory of IDG RAS, at the geophysical observatory of the IMCES SB RAS, geomagnetic variations at the Mikhnevo Geophysical Observatory of IDG RAS and at the magnetic observatory "Novosibirsk".

Благодарности/Acknowledgments:

Analysis of data from the Solar Dynamics Observatory, processing and analysis of data from the ACE spacecraft, geomagnetic indices, and data from the Mikhnevo and Novosibirsk observatories were carried out as part of the state task of the IDG RAS (No. 1220329000185-5 "Manifestation of processes of natural and technogenic origin in geophysical fields") and within the framework of the state task of the IPE RAS. Processing and analysis of the data obtained at the GO IMCES were carried out within the framework of the state task of the IMCES SB RAS (project FWRG2021-0001, No. 121031300154-1).

FEATURES OF THE FRACTALITY OF TEMPERATURE IN THE WETTERSTEINS MOUNTAINS

S.A. Riabova^{1,2}

¹Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ²Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia <u>riabovasa@mail.ru</u>

One of the methods for studying nonlinear complex processes, which has recently received wide development in a wide variety of fields of science, is multifractal analysis [1–2]. In meteorology and climatology, multifractal methods are mainly used in the analysis of precipitation data, with studies ranging from simple empirical studies [3] to testing models [4]. It should be noted here that there are significantly fewer studies devoted to the analysis of the multifractality of temporal variations in air temperature [5].

The purpose of this work was to study multifractal features of air temperature in the Wettersteins Mountains. In this work, we used data from instrumental observations of variations in air temperature at a weather station located on Mount Zugspitze (the highest peak of the Wettersteins Mountains). Mount Zugspitze is located in a temperate climate zone with prevailing westerly winds.

Благодарности/Acknowledgments:

The research was carried out as part of the state task of the IDG RAS (No. 1220329000185-5 "Manifestation of processes of natural and technogenic origin in geophysical fields") and within the framework of the state task of the IPE RAS.

Литература/References:

1. Riabova, S.A., 2023. Study of the multifractality of geomagnetic variations at the Belsk Observatory. Doklady Earth Sciences 508(1): 93-97.

2. Sivakumar, B., 2000. Fractal analysis of rainfall observed in two different climatic regions. Hydrological Sciences Journal 45(5): 727-738.

3. Svensson, C., Olsson, J., Berndtsson, R., 1996. Multifractal properties of daily rainfall in two different climates. Water Resources Research 32(8): 2463-2472.

Garcia-Marin, A.P., Jimenez-Hornero, F.J., Ayuso-Munoz, J.L. 2008. Multifractal analysis as a tool 4. for validating a rainfall model. Hydrological Processes. V. 22. No. 14. P. 2672-2688.

5. Jiang, L., Zhang, J., Liu, X., Li, F., 2016. Multi-fractal scaling comparison of the air temperature and the surface temperature over China. Physica A 462: 783-792.

INFORMATION ANALYTICAL SYSTEM AS A METHOD OF BASIC RESEARCH AND A TOOL FOR DECISION MAKING SYSTEM FOR LAKE ONEGO AND WATERSHED CASE N.N. Filatov¹, V.N. Baklagin¹, A.V. Isaev^{1,2}, S.A. Kondratyev^{1,3}, O.P. Savchuk¹

¹Northern Water Problems Institute, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Karelia, Russia)

²St. Petersburg Branch of the Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences

(St. Petersburg, Russia)

³Institute of Limnology, Russian Academy of Sciences (St. Petersburg, Russia)

nfilatov@rambler.ru

An information analysis system (IAS) is being developed to assess the state and predict the dynamics of the lake Onego-watershed system [1]. Forecasting of the state of the lake ecosystem in the situations of climate change and active exploitation of its resources (water, energy, recreational and biological resources, transport) is conducted with fine resolution three-dimensional mathematical model of the lake ecosystem [2,3], coupled with a model of runoff from the watershed [4]. Lake and watershed models are combined with a database and knowledge base in a single IAS [5]. The prognostic assessments of the seasonal and long-term dynamics of the lake ecosystem performed using the IAS serve as the basis for identifying the possible economic, social and cultural consequences of regional and global changes. Operational IAS is necessary to create a management decision support system.

Despite a wide-ranging research, there is almost no information regarding the major biogeochemical fluxes that could characterize the past and present state of the European Lake Onego ecosystem and be used for reliable prognostic estimates of its future.

To enable such capacity, we adapted and implemented a three-dimensional coupled hydrodynamical biogeochemical model of the nutrient cycles in Lake Onego. The model was used to reconstruct three decades of Lake Onego ecosystem dynamics with daily resolution on a first step 2×2 km grid and them 1 × 1. A comparison with available information from Lake Onego (Onegskoe Lake. Atlas, 2010) and other large boreal lakes proves that this hindcast is plausible enough to be used as a form of reanalysis. This model will be used as a form of studies of Lake Onego ecosystem, including long-term projections of ecosystem evolution under different scenarios of climate change and socio-economic development.

A three-dimensional coupled hydrodynamical biogeochemical model of the nitrogen and phosphorus cycles has been used for a long-term reanalysis of the Lake Onego ecosystem. The comparison between simulation and sparse irregular observations, presented in the first part of this paper, demonstrated plausibility of the reconstructed temporal and spatial features of biogeochemical dynamics at a long-term scale, while seasonal dynamics of variables and fluxes are presented here. As new regional phenological knowledge, the reanalysis quantifies that the spring phytoplankton bloom, previously overlooked, reaches a maximum of $500 \pm 128 \text{ mg C} \text{ m}-2 \text{ d}-1$ in May, contributes to approximately half of the lake's annual primary production of 17.0–20.6 g C m-2 yr-1, and is triggered by increasing light availability rather than by an insignificant rise in water temperature. Coherent nutrient budgets provide reliable estimates of phosphorus and nitrogen residence times of 47 and 17 years, respectively. The shorter nitrogen residence time is explained by sediment denitrification, which in Lake Onego removes over 90 % of the bioavailable nitrogen input, but is often ignored in studies of other large lakes. An overall assessment of the model performance allows us considering the model a necessary and reliable tool for scenario simulations of possible changes in the Lake Onego ecosystem at the requested spatial and temporal scales.

Благодарности/Acknowledgments:

The work was carried out under the Russian Science Foundation grant No. 22-17-00193.

Литература/References:

1. Filatov N.N., Baklagin V.N., Isaev A.V., Kondratyev S.A., Savchuk O.P. Developing a "lakecatchment" information analysis system as a method for basic research and a tool for decision-making (Lake Onego case study). Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences. 2022. No. 6. 2022. № 6. doi: 10.17076/lim1683.

2. Savchuk O.P., Isaev A.V., Filatov N.N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part II: Seasonal dynamics and spatial features; integral fluxes // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15(2). P. 98–109. doi: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8/.

3. Isaev A.V., Savchuk O.P., Filatov N.N. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego ecosystem, 1985–2015. Part I: Long-term dynamics and spatial distribution // Fundamental and Applied Hydrophysics. 2022. Vol. 15, no. 2. P. 76–97. doi: 10.48612/fpg/e1m2-63b5-rhvgi.

4. Kondratyev S.A., Shmakova M.V. Impact of future climate changes on runoff from the Lake Onega catchment // Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Limnology & Oceanology. 2022. No. 6. p. 41-49.doi: 10.17076/lim1683.

5. Baklagin V.N. Software implementation of the "lake-catchment" information and analytical system // Proceedings of the eighth international scientific conference-school of young scientists "Physical and mathematical modeling of processes in geological environments", October 12-14, 2022, Moscow. – M.: Institute of Mechanics and Mechanics RAS, 2022–167-170 p.

LINEAR STABILITY OF THE FILTRATION FLOW WITH THE LIQUID-GAS INTERFACE SURFACE IN THE FORCHHAMMER APPROXIMATION

P.I. Kozhurina, A.M. Tomasheva, S.V. Gorkunov, G.V. Kolomiytsev

Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow,

Russia

polinakozhurina2020@gmail.com

Significant share of gas and oil fields belongs to oil reservoirs with a gas cap [1]. Oil production from such fields has certain peculiarities and differs from the development of purely oil reservoirs. Pressure reduction in the oil-saturated region causes movement of the gas-oil contact boundary. The movement of this interface surface may be unstable, resulting in gas breakdown in the producing well and the formation of a region of immobile oil in the reservoir [2].

The evolution of infinitesimal and finite localized perturbations for a moving phase transition front was studied in [3, 4] in the Darcy approximation. The development of gravitational instability in a twolayer fluid of constant and variable viscosity in a porous medium was numerically investigated in [5, 6] also using Darcy's law. The stability of the gas-oil interface under pressure drop in the oil-saturated region was studied in [7] in the framework of Darcy filtration theory. The surface stability criterion was found, and it was shown that when the parameters are changed, the transition to the unstable regime is realized simultaneously at all wave numbers. Using the network model [8, 9] it was shown [10] that anomalous short-wave instability persists in the nonlinear case. It can be assumed that Darcy's law is inapplicable for description of liquid filtration in the presence of phase transition.

Oil movement in a porous medium is considered for the case when a horizontal oil-saturated reservoir is bordered by a gas cap from above and a highly permeable layer with constant pressure P_L below (Fig. 1). Oil filtration in the system is considered within the framework of the Forchhammer equation. A horizontally infinite reservoir includes a region Ω_f filled with oil. The region above the liquid layer is filled with a large volume of gas. So, its motion can be neglected and the pressure in the gas P_a can be considered constant. Then at the contact boundary S(x, t) the pressure corresponds to the pressure in the gas.



Figure 1. Schematic diagram of the porous medium layer

Oil is assumed to be incompressible, and its motion is described by Forchhammer's filtration law considering the force of gravity:

$$div \vec{v} = \mathbf{0}, (1a)$$

$$0 = -\nabla (P + \rho gz) - \frac{\mu}{k} \vec{v} - \beta \frac{\mu}{k} v \vec{v}. (1b)$$

Let the interface surface be planar and located perpendicular to the z-axis. The pressure distribution and the filtration rate corresponding to this distribution, obtained from (1b), is the basic solution to be investigated for stability:

$$P_{b}(z,t) = P_{L} + \frac{P_{a} - P_{L}}{H(t)} z, (2)$$
$$\vec{V}_{b}(t) = \left\{ 0, -\left(\frac{\sqrt{1 + \frac{4k\beta}{\mu}} \left(\rho g + \frac{P_{a} - P_{L}}{H(t)}\right) - 1}{2\beta}\right) \right\}. (3)$$

Then the velocity of displacement of the contact surface in the direction of the external normal coincides with the normal component of the filtration velocity:

$$\frac{d H(t)}{d t} = -\left(\frac{\sqrt{1 + \frac{4k\beta}{\mu}\left(\rho g + \frac{P_a - P_L}{H(t)}\right) - 1}}{2\beta}\right). (4)$$

From (4) we obtain an implicit function of the front position

$$t = \frac{b}{1-a_1} H\left(1 + \sqrt{a_1 + \frac{a_2}{H(t)}}\right) + \frac{ba_2}{(1-a_1)^2} \ln|(1-a_1)H - a_2| - \frac{ba_2(a_1+1)}{(2\sqrt{a_1}(a_1-1)^2} \ln\left|\frac{\sqrt{a_1 + \frac{a_2}{H}} - \sqrt{a_1}}{\sqrt{a_1 + \frac{a_2}{H}} + \sqrt{a_1}}\right| + \frac{ba_2}{(a_1-1)^2} \ln\left|\frac{\sqrt{a_1 + \frac{a_2}{H}} - 1}{\sqrt{a_1 + \frac{a_2}{H}} + 1}\right| - f(H(0)), (5)$$

where

$$a_1 = 1 + \frac{4k\beta}{\mu}\rho g, \ a_2 = \frac{4k\beta}{\mu}(P_a - P_L), \ b = 2\beta.$$

As can be seen, the expression with $a_1 = 1$, i.e., when gravity is not considered, has many peculiarities. Let us write down the expression obtained without taking into account the gravity force:

$$t = -\frac{bH^2}{2a_2} + \frac{ba_2}{8} + \frac{bH\left(a_2 - 2H\sqrt{1 - \frac{a_2}{H}}\right)}{4a_2}.$$
 (6)

We are looking for the solution of the problem on the evolution of infinitesimal perturbations of the solution (2) - (3) in the form

$$S(x,t) = H(t) + s(x,t), (7)$$

$$P(x,z,t) = P_b(z,t) + p(x,z,t), (8)$$

$$V_x(x,z,t) = u(x,z,t), (9)$$

$$V_z(x,z,t) = V_{z,b}(t) + v(x,z,t), (10)$$

where s(x,t), p(x,z,t), u(x,z,t), v(x,z,t) are small perturbations of the oil-gas interface surface position, pressure, horizontal and vertical velocity components, respectively. Let us substitute (7) – (10) into (1):

$$\frac{\partial(P_b+p)}{\partial z} = -\frac{\mu}{k}V_{z,b} + \nu - \beta\frac{\mu}{k}(V_{z,b}+\nu)\sqrt{(V_{z,b}+\nu)^2 + u^2 - \rho g,(11)}$$
$$\frac{\partial(P_b+p)}{\partial x} = -\frac{\mu}{k}u - \beta\frac{\mu}{k}u\sqrt{(V_{z,b}+\nu)^2 + u^2},(12)$$
$$\frac{\partial}{\partial x}u + \frac{\partial}{\partial z}(V_{z,b}+\nu) = 0.(13)$$

Boundary conditions are

$$P_b(0,t) + p(x,0,t) = P_L,(14)$$

$$P_b(H(t) + s(x,t),t) + p(x,H(t) + s(x,t),t) = P_a.(15)$$

We obtain a system of linearized equations with boundary conditions:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial z} = -\frac{\mu}{k}v + 2\beta\frac{\mu}{k}vV_{z,b} \\ \frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\mu}{k}u + \beta\frac{\mu}{k}uV_{z,b} \\ \frac{\partial}{\partial x}u(x,z,t) + \frac{\partial}{\partial z}v(x,z,t) = 0 \\ p(x,0,t) = 0, (17) \\ s(x,t)\frac{\partial P_b(z,t)}{\partial z} + p(x,H(t),t) = 0. (18) \end{cases}$$

We are looking for a solution for small perturbations p(x, z, t), $u(x, z, t) \bowtie v(x, z, t)$ in the form of

$$p(x, z, t) = \Pi(z)f(t) \exp(iKx), (19)$$

$$u(x, z, t) = U(z)f(t) \exp(iKx), (20)$$

$$v(x, z, t) = V(z)f(t) \exp(iKx), (21)$$

$$s(x, t) = C_{1}f(t) \exp(iKx), (22)$$

 $s(x, t) = C_3 f(t) exp(iKx).$ (22) Substituting (18) – (19) into the system (16), we obtain the solution:

$$\begin{cases} U(z) = C_1 e^{\lambda z} + C_2 e^{-\lambda z}, \\ V(z) = \frac{1}{iK} \frac{-1 + \beta V_{z,b}}{-1 + 2\beta V_{z,b}} \left(\lambda C_1 e^{\lambda z} - \lambda C_2 e^{-\lambda z}\right), \\ \Pi(z) = \frac{1}{iK} \frac{\mu}{k} \left(-1 + \beta V_{z,b}\right) \left(C_1 e^{\lambda z} + C_2 e^{-\lambda z}\right), \end{cases}$$
(23)

where

$$\lambda = K \sqrt{\frac{-1 + 2\beta V_{z,b}}{-1 + \beta V_{z,b}}}.$$
 (24)

In linear approximation, the normal velocity of the contact surface can be found from the equation $i(-1 + \beta V_{z,b})\lambda(e^{H(t)\lambda} + e^{-H(t)\lambda}) = f'(t) = 0$

$$\frac{(-1+\beta V_{z,b})\kappa(e^{-1}+e^{-1})}{(-1+2\beta V_{z,b})K}C_1 + \frac{f(t)}{f(t)}C_3 = 0. (25)$$

The boundary conditions (17) - (18) take the form

$$\frac{P_a - P_L}{H(t)} C_3 - i \frac{\mu}{k} \frac{\left(-1 + \beta V_{z,b}\right)}{K} \left(e^{\lambda H(t)} - e^{-\lambda H(t)}\right) C_1 = 0. (27)$$

The system of equations (25) - (27) is considered. The system has a nontrivial solution if the determinant of the coefficient matrix is zero. From this condition we find the dispersion relation

$$\frac{f'(t)}{f(t)} = -\lambda_1 \frac{k \left(e^{H(t)\lambda_1} + e^{-H(t)\lambda_1} \right) (P_a - P_L)}{\mu (e^{H(t)\lambda_1} - e^{-H(t)\lambda_1}) \left(-1 + 2\beta V_{z,b} \right) H(t)}.$$
 (28)
With $K \to \infty$
$$\frac{f'(t)}{f(t)} = -K \frac{k (P_a - P_L)}{\mu \sqrt{\left(-1 + 2\beta V_{z,b} \right) \left(-1 + \beta V_{z,b} \right)} H(t)}.$$
 (29)

Consequently, in the Forchhammer approximation the attenuation or growth rate of short-wavelength perturbations is unbounded as the wave number increases.

Благодарности/Acknowledgments:

This work was supported by the Russian Science Foundation grant N_2 21-11-00126. The authors express their gratitude to Vladimir A. Shargatov for valuable advice during the research and recommendations on the design of the article.

Литература/References:

1. Lapuk, B. B., 2002. Theoretical founfations for the development of natural gas fields. Institute for Computer Research, Moscow-Izhevsk. 296 p.

2. Tsypkin, G.G., Shargatov, V.A., 2018. Influence of capillary pressure gradient on connectivity of flow through a porous medium. Int. J. Heat and Mass Transfer. 127:1053-1063.

3. Il'ichev, A.T., Shargatov, V.A., 2013. Dynamics of water evaporation fronts. Comput. Math. and Math. Phys. 53:1350-1370.

4. Shargatov, V.A., Gorkunov, S.V., Il'ichev, A.T., 2019. Dynamics of front-like water evaporation phase transition interfaces. Commun. in Nonlinear Sci. Numer. Simul. 67: 223-236.

5. Soboleva, E.B., 2021. Onset of Rayleigh–Taylor Convection in a Porous Medium. Fluid Dyn. 56: 200–210.

6. Soboleva, E.B., 2018. Density-driven convection in an inhomogeneous geothermal reservoir. Int. J. Heat and Mass Transfer. 127:784-798.

7. Tsypkin, G.G., 2020. Instability of a light fluid over a heavy one under the motion of their interface in a porous medium. Fluid Dyn. 55: 213-219.

8. Sorbie, K., Clifford, P., Jones, E., 1989. The rheology of pseudoplastic fluids in porous media using network modeling. J. Colloid Interface Sci.130: 508-534.

9. Li, J., McDougall, R., Sorbie, K., 2017. Dynamic pore-scale network model (PNM) of water imbibition in porous media. Adv. Water Resour. 107: 191-211.

10. Shargatov, V.A., Tsypkin, G.G., Gorkunov, S.V., Kozhurina, P.I., Bogdanova, Y.A., 2022. On the Short Wave Instability of the Liquid/Gas Contact Surface in Porous Media. Mathematics.10: 3177.

BUILDING A DEEP LEARNING MODEL BASED ON WAVELET SCATTERING DECOMPOSITION FOR ANALYSIS OF SEISMIC SIGNALS I.A. Abzalilov^{1,2}, N.A. Baryshnikov¹, S.B. Turuntaev¹

¹RAS Institute of Geosphere Dynamics, Moscow, Russian Federation ²Moscow Institute of Physics and Technology

geospheres@idg.chph.ras.ru

Recent advances in the use of convolutional neural networks (CNN) and attention-based models (Transformer) to solve the problem of seismic waves phase picking have generated significant interest in the topic of creating and developing deep learning models for analyzing seismic data. As a rule, this problem comes down to the problem of classifying seismic signals. One of the promising areas of development in this area is the use of new approaches to extracting features from the analyzed signal, allowing to preserve its information content and at the same time simplify the process of training the model.

The methodology for processing and analyzing a seismic signal from a machine learning point of view is not unique and is common to signal analysis. It includes converting the signal into a time-frequency representation and further applying a neural network. Currently, the task of identifying first arrivals is most effectively solved using convolutional neural networks and neural networks based on Transformer-type architectures [1, 2, 3]. The architecture of the neural network used in this work is shown in Figure 1.



Figure 1. Schematic diagram of the used neural network. The model takes as input a time-frequency representation of the seismic signal. Model includes a CNN layer, 8 Transformer Encoder layers, and FCN layers for the final classification

This paper presents several methods for extracting signal features based on its time-frequency representation (short-time Fourier transform (STFT) on linear and mel scales [4], as well as the least used Wavelet Scattering) and evaluates their impact on the quality of seismic signals classification. Wavelet Scatteringn [5] is an equivalent deep convolutional network formed by a cascade of wavelets, modular nonlinearities, and low-pass filters. It produces representations that are time-shift invariant, resistant to noise, and time warping, which proves useful in many classification problems.

In the course of the work, the problem of separating sections of seismic signals in an exemplary formulation was solved [3]. The model was trained on the California seismic dataset to classify p, s waves and noise. The application of Wavelet Scattering gave similar results to the spectrogram, quality metric value. The accuracy in the lower manifestations exceeded 96.5%. While maintaining the stated advantages of Wavelet Scattering, this will allow this representation to be effectively applied to higher frequency events associated with microseismic monitoring.

Благодарности/Acknowledgments:

The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. 122032900167-1).

Литература/References:

1. Zhu W., Beroza G.C. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method // Geophys. J. Int. 2019. Vol. 216, № 1. P. 261–273.

2. Mousavi S.M. et al. Earthquake transformer—an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking // Nat. Commun. Springer US, 2020. Vol. 11, № 1.

3. Stepnov A., Chernykh V., Konovalov A. The seismo-performer: A novel machine learning approach for general and efficient seismic phase recognition from local earthquakes in real time // Sensors. 2021. Vol. 21, № 18.

4. Umesh S., Cohen L., Nelson D. Fitting the Mel scale // ICASSP, IEEE Int. Conf. Acoust. Speech Signal Process. - Proc. 1999. Vol. 1, № April. P. 217–220.

5. Andén J., Mallat S. Deep scattering spectrum // IEEE Trans. Signal Process. 2014. Vol. 62, № 16. P. 4114–4128.

THE SIMULATION OF ELECTRONIC KINETICS OF SINGLET OXYGEN IN THE POLAR IONOSPHERE, AT NIGHTGLOW ALTITUDES AND IN SPRITES A.S. Kirillov

Polar Geophysical Institute, Apatity, Murmansk region, Russia kirillov@pgia.ru

The calculation of the quenching rate coefficients of singlet electronically excited $O_2(b^1\Sigma_g^+,v\geq 0)$ molecules by oxygen molecules O_2 and nitrogen molecules N_2 was carried out [1,2]. It has been shown that the dominant channels for the quenching of singlet oxygen by oxygen molecules are intermolecular processes of electronic excitation transfer with the formation of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0)$ and $O_2(a^1\Delta_g,v=0)$

 $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \ge 0) + O_2(X^3\Sigma_g^-, v = 0) \to O_2(X^3\Sigma_g^-, v \ge 0) + O_2(b^1\Sigma_g^+, a^1\Delta_g; v = 0).$

When we consider the collision with nitrogen molecules, the main quenching mechanism is the intramolecular transition with vibrational excitation of N_2

 $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \ge 0) + N_2(X^1\Sigma_g^+, v = 0) \rightarrow O_2(a^1\Delta_g, v \ge 0) + N_2(X^1\Sigma_g^+, v > 0).$

The calculated coefficients are used in calculating the relative populations of $O_2(b^1\Sigma_g^+, v \ge 0)$ at the altitudes of the polar ionosphere, nightglow and sprites.



Figure 1. The comparison of the calculated populations of $O_2(b^l \Sigma_g^+, v=1-20)$ at nightglow altitudes (T=300 and 200 K – solid and dashed lines, respectively) with experimental data received on Keck I telescope by Slanger et al. [3]

The vibrational populations of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ at nightglow altitudes of 80-110 km were calculated and presented in Fig.1. The populations of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ are calculated at atmospheric temperatures T=300 and 200 K. We compare the vibrational populations with results of experimental measurement of emission intensities of the Atmospheric O₂ bands made on Keck I telescope [3]. The comparison of our results with the data of experimental estimates available in the scientific literature gives satisfactory agreement. It has been shown that the dependence of the emission intensities of Atmospheric O₂ bands on the vibrational level is primarily determined by the kinetic features of the interaction of singlet electronically excited oxygen with oxygen molecules.

The mechanisms of the production of electronically excited $O_2(b^l \Sigma_g^+, v)$ and the emission of Atmospheric bands of molecular oxygen in the lower polar ionosphere have been studied. It has been

shown that the main contribution to the emission of the 762 and 771 nm bands is related with the processes of direct excitation by auroral electrons and the transfer of electronic excitation energy from metastable atomic oxygen $O(^{1}D)$.

For the first time, calculations of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ concentrations at altitudes of 70 and 50 km of the Earth's middle atmosphere were carried out during a pulsed discharge (sprites) with a duration of the order of $\tau \approx 5 \,\mu s$ and taking into account the processes of intramolecular and intermolecular transfers of excitation energy during inelastic collisions. The scheme of the intermolecular processes with the excitation of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ is presented in Figure 2. The quenching rate coefficients of the interaction $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2$ have been calculated in [4].



Figure 2. The scheme of the intermolecular processes $N_2(A^3\Sigma_u^+) + O_2$ with the excitation of $O_2(b^1\Sigma_g^+, v)$

In the case of sprites both the contribution of the process of direct excitation of the singlet state $b^1\Sigma_g^+$ by discharge electrons and the contributions from the triplet states of molecular nitrogen during molecular collisions and processes of transfer of excitation energy between colliding molecules were studied. The results of the calculation for the altitude of 70 km are shown in Figure 3. Figure 3 shows the dependence of concentrations of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=1)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=2)$ on time (sec). Here we present the contributions of discharge electrons and of five triplet states of N₂. Calculations clearly showed that when we study the kinetics of metastable molecular oxygen $O_2(b^1\Sigma_g^+)$ at sprite luminescence altitudes, it is necessary to take into account both direct excitation by discharge electrons and inelastic molecular collisional processes in which excitation energy is transferred from N₂ triplet states.



Figure 3. The dependence of concentrations of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=1)$, $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=2)$ on time (sec). Contributions of N_2 triplet states $A^3\Sigma_u^+$, $B^3\Pi_g$, $W^3\Delta_u$, $B'^3\Sigma_u^-$, $C^3\Pi_u$ are orange, red, green, yellow, blue lines, respectively. Contributions of discharge electrons are dashed lines. The sums of contributions of all processes are solid lines

Литература/References:

1. Kirillov, A.S., 2012. Calculation of rate coefficients for the interaction of singlet and triplet vibrationally excited oxygen. Quantum Electronics, 42: 653-659.

2. Kirillov, A.S., 2013. The calculations of quenching rate coefficients of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v)$ in collisions with O_2 , N_2 , CO, CO_2 molecules. Chemical Physics, 410: 103-108.

3. Slanger, T.G., Cosby, P.C., Huestis, D.L., & Osterbrock, D.E., 2000. Vibrational level distribution of $O_2(b^1\Sigma_g^+,v=0-15)$ in the mesosphere and lower thermosphere region. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 105: 20557-20564.

4. Kirillov, A.S., & Belakhovsky, V.B., 2021. The kinetics of O₂ singlet electronic states in the upper and middle atmosphere during energetic electron precipitation. Journal of Geophysical Research: Atmosphere, 126: e2020JD033177.

ELASTOPLASTIC MODEL WITH DESTRUCTION FOR SIMULATION OF LOW-SPEED IMPACT ON AN ICE PLATE

E.K. Guseva^{1,2}, V.I. Golubev¹, V.P. Epifanov², I.B. Petrov¹

¹Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Moscow Region, Russia ²Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the Russian Academy of Sciences (IPMech RAS), Moscow,

Russia

guseva.ek@phystech.edu

Ice is a central element of many natural and anthropogenous processes in the Arctic region. It has a complex structure, which can deeply affect its characteristics [1]. Thus, there is no universal rheology model that can be used to fully represent its behavior. This work is part of a series of works dedicated to the formulation of the method that will determine the correct model based on laboratory and numerical experiments. The first step towards this goal is the investigation of existing models and the creation of composite models that can encapsulate ice destruction and elastoplastic behavior during a low-speed impact on the ice disc by the ball striker.

Physical model experiment was conducted in the Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics of the RAS, general procedure is described in [2]. A frozen ice disk was placed in a refrigeration chamber on a massive metal stand with the ability to slip. Above it, on a string, the hard steel ball was hung. A piezoelectric accelerometer was set in the middle of the ball. Another sensor was set at the rear side of the ice plate along the striking axis. The impact velocity of this direct strike was equal 0.56 m/s. As a result, the ball's acceleration (or force, F) in the process was obtained (Figure 1, blue line on the right). In order to compare with the numerical results, the ball's velocity was calculated using its mass m = 1.76 kg according to the formula according to the formula: $v(t) = 0.56 + 1/m \int_0^t F(\tau) d\tau$, which was corrected: $v(t) = 0.56(1 - (v - 0.56)(\min(v - 0.56))^{-1})$. Next, the ball's coordinate was obtained: $x(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau$.



Figure 1. On the left: computational domain and grid parameters. In the middle: elastoplasticity model with destruction. On the right: results of the laboratory experiments, blue line – sensor in the middle of the ball, purple – at the rear side of the ice plate along the striking axis

In order to simulate the impact, the computational domain in a two-dimensional setting was divided into areas, as shown in Fig. 1. In each domain, structured grids were built. Segments 2 were formed by the rotation of segment 2*. Between areas 1-2, a full adhesion contact condition was used, between the disc and the stand, the contacting cells of the ball and the ice – free slippage condition. On the left, right, and bottom sides of the stand, no reflection boundary was set; on other boundaries, a free boundary condition was applied. Grids were moved by the Lagrange corrector. The time step was equal to $5 \cdot 10^{-8}s$. The simulation was conducted until the ball stops contacting with the ice.

The isotropic linear elasticity model [3] was used as the governing system of equations. This model reproduces primary and secondary waves with velocities c_p , c_s . The last parameter that defines the material is density ρ . In the ball and the stand, these parameters equal 5700 m/s, 3100 m/s, and 7800 kg/m³; in the ice, 3600 m/s, 1942 m/s, and 917 kg/m³. The system was solved using the grid-characteristic method [4] with a 3rd order scheme that was modified by the grid-characteristic monotonicity criterion [5]. As a result, velocity and stress tensor patterns were obtained.

For plasticity, a simplified version of the Prandtl-Reuss model [6] was considered. It consists of the correction of the deviator of the stress tensor, $s_{ij} = s_{ij}k(0.5s_{nl}s_{nl})^{-0.5}$, when the von Mises yield criterion is fulfilled, $0.5s_{ii}s_{ii}$ -k² > 0, k – maximum shear stress (Pa). The next step consists in dividing the ice into zones. This work follows the model of indentation presented in [6-7]. It is thought that the process of ice destruction happens just below the ball. The plasticity behavior is considered to be centered in a small area in the impact zone. Both zones were regarded as being in the form of hemispheres with radiuses a and r respectively. The overview of the model is depicted on Fig. 1 in the middle. According to the works [7-8], the relation between radiuses is approximated to be linear r/a = const. This constant is one of the parameters which is varied in the numerical experiments, and a is calculated at each time step based on the depth of the indentation, h. For the destructed material elasticity model is used, and elastic parameters are changed. In this work, Lame parameter μ was declined tenfold and by a factor of 100 times, and parameters specific to water and snow are considered. These parameters are noted with upper index "d". Another modification to this model was added as all negative principal stresses were set to zero. Thus, the approach stated in [9] is used and the sand model is implemented. The comparison of simulations with and without correction of the stress tensor is presented on Figure 2. On the figures the ball's coordinate taken from the bottom point and its modulus of velocity from its center are plotted. The velocities had a lot of oscillations; thus, they were smoothened by the Savitzky-Golay filter with the length of the filter window set to 51 and linear polynomials used to fit the samples.



Figure 2. Comparison of models with and without correction of the stress tensor, $k = 3 \cdot 10^5$. Graphs in each row share the same legend

According to Figure 2, for different elastic parameters of the destructed medium and constants r/a the results with and without correction occur to be close. Moreover, the trends of the models' reaction to the change of their parameters are similar. Thus, the model with correction was chosen for further demonstrations. On Figure 3 the results with different waves' velocities and the densities in the destructed zone are presented. There seems to be no definite relation between the change of the elastic parameters and the amplitude of x with the position of minimum of velocity's modulus. However, it is visible that the more constant r/a is, the less the difference between the curves is.

Figure 4 shows the influence of the maximum shear stress on the results. The increase of k leads to the increase of the indentation and the time point when velocity's modulus is at minimum. However, the less r/a is the less difference between high maximum shear stress is. Overall, Figures 2-4 demonstrate that the increase of the constant r/a results in the increase of depth of the ball's immersion. Moreover, it moves the position of minimum of velocity's modulus to the right and increases the angle between the curve before and after this point. Finally, the destruction and plasticity areas increase in volume, but the plasticity model rather than the destruction one increases its influence on the results. As a result, the formulated model shows the potential to explain the complex behavior of the iceions.



Figure 3. Model with correction of the stress tensor with different elastic parameters in the destructed zone, $k = 3 \cdot 10^5$



Figure 4. Model with correction of the stress tensor with different maximum shear stresses. Graphs in each row share the same legend

Благодарности/Acknowledgments:

This work was carried out with the financial support of the Russian Science Foundation, project no. 23-21-00384.

Литература/References:

1. Maurel, A., Lund, F. & Montagnat, M., 2015. Propagation of elastic waves through textured polycrystals: application to ice. Proc Math Phys Eng Sci. 71(2177): 20140988.

2. Epifanov, V. P., 1985. Ice destruction from impact interactions. Akademiia Nauk SSSR Doklady. 284(3): 599-603.

3. Novatskii, V., 1975. Theory of Elasticity. Mir, Moscow. [in Russian].

4. Petrov, I.B., 2023. Grid-characteristic methods. 55 years of developing and solving complex dynamic problems. Computational Mathematics and Information Technologies. 6(1): 6-21.

5. Guseva, E.K., Golubev, V.I. & Petrov, I.B., 2023. Linear Quasi-Monotone and Hybrid Grid-Characteristic Schemes for the Numerical Solution of Linear Acoustic Problems¹. Numer. Analys. Appl. 16: 112-122.

6. Bruhns, O. T., 2014. The Prandtl-Reuss equations revisited. Z. Angew. Math. Mech. 94(3): 187-202.

7. Johnson, K.L., 1970. The correlation of indentation experiments. Journal of The Mechanics and Physics of Solids. 18: 115-126.

8. Studman, J., Moore, M.A. & Jones, S.E., 1977. On the correlation of indentation experiments. J. Phys. D: Appl. Phys. 10: 949-956.

9. Favorskaya, A.V., Golubev, V.I. & Grigorievyh, D., 2018. Explanation the difference in destructed areas simulated using various failure criteria by the wave dynamics analysis. Procedia Computer Science. 126: 1091-1099.

ВОЛНОВЫЕ ВОЗМУЩЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА ГЛУБОКОГО ОКЕАНА И ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА ОТ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ В.В. Булатов

Институт проблем механики им.А.Ю.Ишлинского РАН, Москва

<u>internalwave@mail.ru</u>

Решена задача о дальних волновых полях, возникающих на границе раздела льда и бесконечно глубокого однородного океана при обтекании локализованного источника возмущений. Получено интегральное представление решения и с помощью метода стационарной фазы построено асимптотическое представление решения для различных режимов волновой генерации. Численные расчеты показывают, что при изменении скоростей потока и толщины льда происходит заметная качественная перестройка фазовых картин возбуждаемых дальних волновых полей на границе раздела льда и жидкости.

1.Введение.

Изучение волновых процессов в море с плавающим ледяным покровом актуально для изучения его реакции на различные гидродинамические возмущения, движущиеся надводные и подводные суда, процессы распада ледяных полей в интересах судоходства, а также совершенствования методов дистанционного зондирования поверхности ледяного покрытия. Поверхностные возмущения ледяного покрова, которые могут быть зарегистрированы с помощью специальных радиолокационных и оптических систем, несут информацию не только об источниках возмущений, но и о характеристиках морской среды подо льдом [1-3]. Плавающий ледяной покров, определяющий динамическое взаимодействие между океаном и атмосферой, влияет на динамику не только морской поверхности, но и подповерхностных вод, так как в общем движении по вертикали участвует как ледяной покров, так и вся масса жидкости под ним. Одним из заметных источников возбуждения ледяного покрова могут являться интенсивные внутренние гравитационные волны, в частности что колебания ледяного покрова за счет внутренних волн могут быть от нескольких сантиметров (прилив) до 2-3 метров (цунами), амплитуды до 30 см регистрировались при наличии ветровых волн [4, 5].

Обычно предполагается, что ледяной покров является сплошным (его горизонтальные масштабы превышают длины возбуждаемых волн), и при достаточно общих условиях моделируется тонкой упругой физически линейной пластиной, деформации которой малы. Для проведения прогнозных расчетов возмущений ледяного покрова можно подбирать параметры модели генерации так, чтобы приблизить смоделированную волновую систему к реально наблюдаемым в природных условиях картинам возмущения поверхности льда.

2.Постановка задачи и основные результаты.

Целью настоящей работы является решение ранее не рассматриваемой задачи о построении асимптотик дальних волновых возмущений ледяного покрова, возбуждаемых локализованным источником в потоке однородной жидкости бесконечной глубины. Рассматривается поток идеальной бесконечно глубокой жидкости, который обтекает точечный источник мощности массы.

Численные расчеты показывают, что при изменении параметров волновой генерации (изменение скоростей потока и толщины льда) происходит заметная качественная перестройка фазовых картин возбуждаемых волновых полей на границе раздела льда и жидкости. На рисунке 1 представлены результаты расчетов фазовых картин возвышения ледяного покрова для значения толщины льда 1см и скорости потока 10 м/сек. Сплошные линии на рисунке – линии равной фазы, штриховые – волновые фронты. Дисперсионные зависимости могут представлять замкнутые, всюду выпуклые кривые, а также могут иметь две пары точек перегиба, которые существуют только при достаточно малых значениях волновых чисел и расположены симметрично. Усложнение топологии дисперсионных зависимостей приводит к генерации дополнительной системы поперечных волн и появлению соответствующих пар волновых фронтов. В этом случае фазовые картины демонстрируют пространственные структуры типа «ласточкина хвоста» (рисунок 1), когда в фиксированной точке наблюдения происходит качественная перестройка одновременно приходящих волновых фронтов [--]. Наиболее интересными с практической точки зрения являются локальные экстремумы дисперсионных зависимостей, так как асимптотики дальних волновых полей в окрестности соответствующих волновых фронтов и каустик, отвечающих этим экстремумам, можно описать с помощью метода эталонных интегралов. Сложность топологии рассчитанных дисперсионных зависимостей требует для корректного асимптотического исследования дальних полей применения специального математического аппарата.

Численный анализ решений показал, что основными параметрами, которые могут приводить к существенной изменчивости качественных характеристик дисперсионных соотношений, являются толщина льда и скорость потока. Остальные параметры (модуль Юнга, коэффициент Пуассона, напряжение, плотность сред), в пределах естественных масштабов их природной изменчивости практически не влияют на динамику поведения дисперсионных зависимостей. Поэтому усложнение наблюдаемых волновых картин возвышения ледяного покрова может являться одним из признаков заметного изменения только таких параметров морской среды как скорость течения и толщина льда.

Увеличение скорости течения при неизменной толщине льда приводит к расширению (в пространстве волновых чисел) дисперсионных кривых. Кривая, соответствующая меньшей скорости потока, целиком находится внутри кривой, отвечающей большей скорости потока. Поэтому при увеличении скорости течения длина волны вдоль положительной направления горизонтальной оси движения источника возрастает, а вдоль отрицательного направления этой оси убывает. Также при увеличении скорости потока происходит уменьшение пространственной области, где существуют волновые колебания. Вне этой зоны амплитуды дальних волновых полей экспоненциально малы. Этот же эффект наблюдается при изменении толщины льда при неизменном значении скорости потока. При увеличении толщины льда приене волновых чисел) дисперсионных кривых, и, соответственно, расширение пространственной области волновых колебаний. Длина волны вдоль положительного направления оси движения чисел) аконебаний. Длина волны вдоль положительного направления сворстия в воространственной области волновых колебаний. Длина волны вдоль положительного направления оси движения чисел) аконебаний. Длина волны вдоль положительного направления оси движения источника возрастает, а вдоль отрицательного этой оси – убывает.
Численный анализ асимптотик показал хорошее совпадение с точным решением уже на расстояниях, начиная с десяти и более метров от источника, то есть на таких расстояниях можно использовать понятие дальних волновых полей. Поэтому, исходя из результатов рассмотрения подобного класса задач и оценок пространственных масштабов возможного затухания волновых возмущений в природных условиях, представляется вполне обоснованным использования линейного приближения и метода стационарной фазы для расчета возмущений ледяного покрова и получения физически адекватных результатов.

Построенные асимптотики дальних полей дают возможность эффективно рассчитывать основные характеристики волновых возмущений на границе раздела ледяного покрова и качественно анализировать полученные решения. Полученные асимптотические результаты с различными значениями входящих в них физических параметров позволяют провести оценку характеристик возмущений ледяного покрова, наблюдаемых в реальных морских условиях и рассчитывать дальние волновые поля, в том числе, и от нелокальных источников возмущений различной физической природы. В результате проведения модельных многовариантных расчетов по асимптотическим формулам смоделированная волновая система может быть приближена к наблюдаемым в натурных условиях волновым картинам, что дает возможность оценить физические параметры реальных источников в морской среде с ледовым покрытием и определить основные характеристики начальных возмущений, варьируя модельные значения исходных параметров. Таким образом, модели волновой генерации на поверхности раздела морской воды и льда могут быть не только верифицированы, но и использованы для проведения прогнозных оценок.



Рисунок 1. Фазовые картины волновых возмущений поверхности ледяного покрова

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена по гранту РНФ № 23-21-00194.

Литература/References:

1. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. - Севастополь: ФГБУН МГИ, 2017. 360 с.

2. Булатов В.В., Владимиров Ю.В. Волны в стратифицированных средах. - М.: Наука, 2015. 735 с.

3. Ильичев А.Т. Уединенные волны в моделях гидродинамики. - М.: Физматлит, 2003. 256 с.

4. Morozov E. G. Oceanic internal tides. Observations, analysis and modeling. - Berlin: Springer, 2018, 317 p.

5. Velarde M. G., Tarakanov R.Yu., Marchenko A.V. (Eds.). The ocean in motion. Springer Oceanography. - Berlin: Springer International Publishing AG, 2018. 625 p.

ФОРМИРОВАНИЕ СТУРКТУРЫ ЕДИНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОХИМИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ОНЕЖСКОГО ОЗЕРА

В.Н. Баклагин

Институт водных проблем Севера КарНЦ РАН, Петрозаводск, Республика Карелия, Российская

Федерация

<u>slava.baklagin@mail.ru</u>

Основу систем для поддержки принятия решений составляют математические модели, калибрация и верификация которых осуществляется по данным наблюдений, полученных как на сети Росгидромета, так и по данным экспериментов, выполняемых академическими организациями. К сожалению, существующая система государственного мониторинга водных объектов Росгидромета, которая должна обеспечивать проведение наблюдений за состоянием и загрязнением окружающей среды, оценки происходящих в ней изменений, а также прогнозирования, неполноценна как по составу контролируемых веществ и расположению пунктов наблюдений, так и по частоте отбора проб [1]. Также оказалось недостаточно данных наблюдений за состоянием озер, получаемых академическими организациями.

Созданные БД не позволяют обеспечить полноценными данными разрабатываемые информационно-аналитические системы [2] и решать поставленные задачи – использовать для калибрации и верификации создаваемых моделей экосистем [3, 4]. Трудности с созданием единой БД по комплексу гидрологических, химико-биологических параметров Онежского озера обусловлены невыполнением основных принципов организации и проведения наблюдений для решения задач, связанных с оценкой состояния и изменения экосистем озер: комплексность и систематичность наблюдений (при этом комплексность наблюдений должна обеспечиваться одновременностью проведения наблюдений по гидрофизических, гилрохимическим. гидрологическим, гидробиологическим показателям, а также в донных отложениях); согласованность сроков их проведения с характерными фазами гидрологического режима водных объектов; определение химико-биологических параметров воды сопоставимыми методиками.

В связи с этим целью данной работы является формирование способа и структуры общей единой базы данных химико-биологических наблюдений Онежского озера в целях использования ее в качестве натурной основы для калибрации и верификации моделей экосистем для уже разрабатываемой информационно-аналитической системы (ИАС) «Онежское озеро и его водосбор» в рамках проекта РНФ № 22-17-00193 [2].

Сбор данных после 1991 г. диктовался условиями проведения различного рода частных исследовательских задач по государственным заданиям, проектам и грантам, проводимых разными научными коллективами, которые, к сожалению, не имели комплексного (междисциплинарного) и систематического характера. Кроме того, в разные периоды времени использовалось различное оборудование для анализа проб, менялись некоторые методики определения ряда параметров, например, биогенных веществ, первичной продукции фитопланктона и др., что приводило к проблеме сопоставимости результатов. Выполнение не связанных между собой программ повлияло на формирование сетей станций на озере. Поэтому в рамках данной работы была поставлена задача, которая состояла в обобщении и унификации данных для возможности интеграции натурных данных в информационно-аналитической системе. Работы по обобщению существующих баз данных проведены по следующим направлениям: формирование единой сети станций с их географической привязкой; приведение данных к единому формату размерностей; поиск и исправление ошибок; определение массивов данных, по сопоставимым методикам; программная реализация СУБД базы данных и размещение ее на сервере ИВПС КарНЦ РАН.

Одной из самых важных и сложных задач – является формирование единой сети станций. Для разрешения этой проблемы были проведены следующие операции, которые требовали, как ручных, так и автоматизированных действий:

• На основе экспертной оценки была выявлена надежная (референтная) группа станции.

• Разработан алгоритм, с помощью которого на основе уточненного списка станций, классифицированы остальные станции и записи, встречающиеся в базах данных гидробиологических и гидрохимических наблюдений.

На рисунке 1 дана блок-схема, реализующая алгоритм формирования единого списка станций и уточнение геоданных записей баз гидробиологических и гидрохимических данных в единой БД для ИАС «Онежское озеро и его водосбор» [2]. Результат работы алгоритма (реализован в качестве приложения на языке программирования python) позволил получить единый список станций (412 наименований), имеющих географическую привязку на местности, а также реляционные связи с записями о измерениях в базах данных ИВПС.



Рисунок 1. Блок-схема, реализующая алгоритм формирования единого списка станций и уточнение геоданных записей баз гидробиологических и гидрохимических данных

Выявление и устранение грубых ошибок значений гидробиологических и гидрохимических характеристик осуществлялось согласно критерию «трех сигм», описанному в работе [5]. Найденные записи, которые не удовлетворяли критерию «трех сигм» были представлены для экспертной оценки специалистами соответствующей области на адекватность.

По критерию «трех сигм» считается, что с вероятностью P = 0,9973 и значимостью $\alpha = 0,0027$ появление даже одной случайной погрешности, большей, чем маловероятное событие и ее можно считать грубой ошибкой, если:

 $x_i > 3S_x$

где S_x – оценка среднеквадратического отклонения (СКО) измерений.

Величины S_x вычисляются без учета экстремальных значений x_i.

В методе «трех сигм» использовался следующий порядок действий:

- 1. Выявлялось сомнительное значение измеряемой величины наибольшее или наименьшее.
- 2. Вычислялось среднее арифметическое значение выборки без учета сомнительного значения измеряемой величины.
- 3. Определялись величины S_x выборки без учета сомнительного значения измеряемой величины.
- 4. Вычислялась разность среднеарифметического и сомнительного значения измеряемой величины и производилось сравнение.

Если выполняется неравенство:

 $|x_i - \bar{x}| > 3S_x,$

то сомнительное значение подвергалось экспертной оценки, в противном случае, значение оставлялось в ряду.

Экстремально высокие и низкие значения параметров далее анализировалась экспертами на адекватность.

В результате обработки измерений результаты были структурированы в виде реляционных (двумерных) таблиц для каждого из разделов. Для конвертирования данных в формат SQL разработан встроенный в веб-приложение, реализующее ИАС, программный модуль, который позволяет формировать SQL-таблицы из CSV-файлов (данные натурных наблюдений, как правило, состоят из файлов, представленных офисными форматами.doc,.xls,.csv), это делает возможным осуществлять оперативную и технологичную актуализацию базы данных, за счет этого проведено обобщение и приведение к единому формату данных накопленных натурных измерений и результатов экспедиционных исследований, а также интеграция данных в единую базу данных.

Дальнейшим работы направлены на решение проблем, связанных с разработкой методики проверки адекватности модельных расчетов в условиях ограниченного пространственновременного ряда имеющихся натурных данных, поскольку стандартные статистические методы не могут быть применимы ввиду малого объема референтных значений.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-17-00193.

Литература/References:

1. Румянцев В.А., Филатов Н.Н., Кондратьев С.А., 2021. Современное состояние и совершенствование системы мониторинга Ладожского озера / Современное состояние и проблемы антропогенной трансформации экосистемы Ладожского озера в условиях меняющегося климата. М: РАН: 540-558.

2. Филатов Н.Н., Баклагин В.Н., Исаев А.В., Кондратьев С.А., Савчук О.П., 2022. Разработка информационно-аналитической системы «озеро – водосбор» как метода фундаментальных исследований и инструмента обоснования управленческих решений (на примере Онежского озера) // Труды КарНЦ РАН. Лимнология и океанология. 6: 161–172. doi: 10.17076/lim1683.

3. Isaev A., Vladimirova O., Eremina T., Ryabchenko V. & Savchuk O., 2020. Accounting for Dissolved Organic Nutrients in an SPBEM-2 Model: Validation and Verification. Water. 12: 1307. doi: 10.3390/w12051307.

4. Savchuk O. P., Isaev A. V. & Filatov N. N. 2020. Three-dimensional hindcast of nitrogen and phosphorus biogeochemical dynamics in Lake Onego Ecosystem, 1985–2015. Part II: seasonal dynamics

and spatial features; integral fluxes. Fundamental and applied hydrophysics. 15(2): 98-109. doi: 10.48612/fpg/9mg5-run6-4zr8.

5. Сергеев А. Г. 2005, Метрология: Учебник. М.: 272 с.

РЕЗОНАНС МОЛЧАНОВА В СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЕ И В ГАЛАКТИКЕ

А.А. Баренбаум

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия azary@mail.ru

1.Введение.

В 1966 году А.М. Молчанов [1] ввел понятие «слабосвязанной механической системы» и нашел, что в таких системах возможен режим коллективных колебаний, при котором все собственные частоты можно выразить через один свободный параметр, зависящий от масштабов системы. Такой многочастотный резонанс А.А. Молчанов [1-4] попытался применить к Солнечной системе, объясняя этим механизмом правило планетных расстояний Тициуса-Боде [5]. При этом свободным параметром он предложил считать орбитальный период наиболее массивной планеты Солнечной системы – Юпитера. Однако доводы А.М. Молчанова оказались малоубедительными [6,7].

В работе [8] на примере систем регулярных спутников Юпитера, Сатурна и Урана автором показано, что многочастотный параметрический резонанс по А.М. Молчанову действительно существует. Однако его причиной является возмущающая периодическая сила, вызванная осевым вращением центральной планеты. При этом свободный параметр оказывается квантованной величиной, которая определяется взаимодействием всех тел системы. Резонансом Молчанова можно также объяснить закономерность Тициуса-Боде, но уже с двумя свободными параметрами – один для планет земной группы, а другой для планет-гигантов [9], где такими параметрами выступают периоды осевого вращения Солнца, отличающиеся на первой и второй стадиях образования Солнечной системы.

В данной работе показано, что резонанс Молчанова действует не только в Солнечной системе, но и в галактиках. Этот вывод получен с использованием галактической модели, которая связывает ключевые события в истории Земли с движением Солнца в Галактике и циклическими бомбардировками нашей планеты галактическими кометами в периоды попадания Солнца в спиральные рукава и струйные потоки Галактики.

2.Галактическая модель.

Модель разрабатывается автором более 30 лет, уточняясь и совершенствуясь [9-17]. Изначально модель создавалась с целью обнаружения струйного истечения газопылевого вещества из ядерного диска Галактики по данным геологии. Последующие уточненные версии модели использованы при решении актуальных проблем геологии и астрономии. Вопросы разработки и апробации модели рассмотрены в книге [12] и в более поздних статьях автора. Модель [14], наилучшим образом отвечающая данным астрономии и геологии, приведена на рисунке 1, а рис. 2 иллюстрирует точность расчета границ шкалы фанерозоя по этой модели.

В этой модели Галактика имеет 4 одинаковых закрученных логарифмических рукава, вращающиеся как единое целое вокруг центра с периодом $T_G = 200$ млн лет, и 2 газопылевых струйных потока, закрученных в спираль Архимеда, которые истекают со скоростью 300 км/с из 2-х точек быстро вращающегося газопылевого диска. Диск наклонен к галактической плоскости под углом 20° и прецессирует с периодом своего вращения $T_d = 50$ млн лет.

Истекающее из диска газопылевое вещество веерообразно распространяется в Галактике, конденсируясь в плотные облака, кометы и звезды. Эти процессы резко усиливаются в зонах пересечения струйными потоками логарифмических рукавов, которые частично захватывают и накапливают газ и пыль. На расстоянии $R^*=11.47$ Кпк от центра, получившего название радиуса коротации Галактики, радиусы кривизны струйных потоков и рукавов становятся одинаковыми, и зона газоконденсации значительно растягивается вдоль рукавов.

После образования в рукаве Crux-Scutum (IV) Солнце движется по эллиптической орбите, положение которой на рисунке 1 относительно галактических рукавов и Солнца на орбите отвечают современной эпохе. Движение Солнца по орбите характеризуется аномалистическим периодом $T_R = 250$ млн лет и сидерическим периодом $T_{\varphi} = 222.223$ млн лет, что приводит к вращению линии апсид солнечной орбиты в направлении движения Солнца с периодом $T_a = 2.0$ млрд лет. При этом Солнце периодически, то приближается к галактическому центру на расстояние 5.27 Кпк, то удаляется от него на расстояние R^* , совершая колебания малой амплитуды поперек галактической плоскости с периодом $T_z = 50$ млн лет.

В процессе своего движения Солнце пересекает галактические рукава и струйные потоки, и в эти периоды времени длительностью ~2-5 млн лет Солнечная система подвергается интенсивным бомбардировкам галактическими кометами. Такие кометные бомбардировок являются на Земле эпохами глобальных природных катастроф, времена которых четко фиксируются геологами в стратиграфической (геохронологической) шкале фанерозоя в виде ее границ разного ранга (рисунок 2).



Рисунок 1. Современное положение Солнца (Sun) на орбите (эллипс) относительно 4-х рукавов (римские цифры) и 2-х струйных потоков (арабские цифры) в проекции на галактическую плоскость. Малый круг – ядерный диск. Средний круг – диаметр изотермического ядра Галактики. Радиус коротации Галактики R* показан итрихпунктирным кольцом. Стрелка – направление движения Солнца по орбите и поворота линии апсид (прямая линия) орбиты, совпадающие с вращением Галактики и ее ядерного диска. Звездочка в рукаве IV – место, где ранее образовалась Солнечная система



Рисунок 2. Изменение положения Солнца во времени относительно галактических рукавов (полосы) и его расстояние до центра Галактики (синусоида) в проекции на галактическую плоскость. Римские цифры – номера рукавов на рис. 1. Цифры – время (млн лет) попадания Солнца в струйные потоки (кружки) и одновременно в галактические рукава (квадраты). Черные значки – время пересечения струйными потоками галактической плоскости, в которой движется Солнце. Штрихпунктирная линия – радиус коротации Галактики R*. Внизу – геохронологическая шкала с указанием границ эр и систем фанерозоя

3.Обсуждение.

Рисунок 2 показывает, что модель [14] устанавливает тесную связь границ шкалы фанерозоя с кометными бомбардировками. Наиболее интенсивные бомбардировки определяют границы эратем и эр, менее интенсивные – границы систем, а слабые – границы отделов шкалы. Границы отделов отвечают попаданиям Солнца в струйные потоки, границы систем – одновременно в струйные потоки и галактические рукава, а аналогичные попадания Солнца при *R** – границам палеозойской

(Pz) и кайнозойской (Kz) эр. Для мезозоя (Mz) это условие не выполняется, и ее границу относят к сильной бомбардировке на Р/Т-границе.

Привлечение модели к изучению глобальных тектонических и климатических событий в докембрии (ранее 0.57 млрд лет назад) показало, что чередование «сильных» и «слабых» бомбардировок Земли, свойственное фанерозою, имело место на протяжении всей геологической истории Земли [13]. Вместе с тем мощность кометных бомбардировок в разных рукавах Галактики существенно отличается: в рукавах Carina-Sagittarius (I) и Norma-Perseus+1 (III) бомбардировки были слабее, чем в рукаве Perseus (II) и тем более в Crux-Scutum (IV), который оказался не только мощнее, но и «шире» других рукавов [16]. Все геологические события на Земле в этом мощном рукаве имеют наивысший ранг – ранг границ эонов.

4. Результаты.

При решении задач астрономии и геологии с использованием галактической модели получен ряд новых результатов. Наиболее важные из них следующие [15]:

<u>В астрономии:</u>

- Построена спиральная модель Галактики, наилучшим образом удовлетворяющая данным астрономии и геологии. Значения основных параметров спиральной конструкции Галактики найдены с более высокой точностью, чем их удается измерить средствами астрономии.
- Установлено, что с момента образования Солнечной системы период вращения и спиральное строение Галактики, а также параметры орбиты движения Солнца в Галактике не изменились [13]. Найдено, что адекватной физической моделью Галактики является модель звездной изотермической сфера. Для построенной модели Галактики в аналитическом виде получено распределение гравитационного потенциала в ее экваториальной плоскости [14].

В геологии:

- Вскрыта тесная причинно-следственная связь основных геологических событий на Земле с движением Солнца в Галактике и бомбардировками Солнечной системе галактическими кометами.
- Построена единая для фанерозоя и докембрия шкала геологического времени, учитывающая тип и энергию падающих на Землю космических тел.
- Уточнены времена границ ряда систем и отделов шкалы фанерозоя.

В космогонии Солнечной системы:

- Доказана многостадийность формирования Земли и других планет.
- Определен рукав Галактики и указано в нем место, где образовалось Солнце.

Показано, что все крупнейшие события в Солнечной системе происходили в рукавах Галактики на удалении радиуса коротации от ее центра.

5.Заключение.

Данные геологии и астрономии свидетельствуют, что условием адекватности галактической модели является строгое соотношение параметров движения Солнца в Галактике и вращения самой Галактики. Так, за один оборот линии апсид солнечной орбиты с периодом $T_a = 2$ млрд лет Солнце делает 8 оборотов по орбите и 9 оборотов вокруг галактического центра, а сама Галактика и ее ядерный диск совершают 10 и 80 оборотов. Также 80 колебаний делает Солнце поперек галактической плоскости. Т.е. между этими движениями выполняется условие: T_a : T_R : T_q : T_G : T_d : $T_z = 1$: 8: 9: 10: 80: 80. При нарушении хотя бы одного из этих соотношений модель теряет адекватность.

Эти соотношения доказывают, что многочастотный резонанс Молчанова действует и в Галактике, где свободными параметрами являются вращение ее ядерного диска и спиральных

рукавов. В работах [16,17] показано, что в резонансе с орбитальным движением Солнца в Галактике участвует также прецессия плоскости эклиптики Солнечной системы.

Поскольку Солнце – это рядовая звезда Галактики, а аналогичных звезд и спиральных галактик много, то многочастотный параметрический резонанс Молчанова среди таких гравитационно «слабосвязанных» по А.М. Молчанову систем, необходимо рассматривать как чрезвычайно широко распространенное в космосе явление.

Литература/References:

1. Молчанов А.М. Резонансы в многочастотных колебаниях. ДАН. 1966. Т.168. №2. С.284-287.

2. Molchanov A.M. The resonant structure of Solar System. The law of planetary distances. Icarus. 1968. V.8. 203-215.

3. Molchanov A.M. Resonances in complex system. A reply to critiques. Icarus. 1969. V.11. P.95-103.

4. Molchanov., A.M. The reality of resonances in the Solar system. Icarus. 1969. V.11. P.104-110.

5. Ньето, М.М. Закон Тициуса-Боде. М.: Мир, 1976. 190 с.

6. Backus, G.E. Critique of "The resonant structure of Solar system" by A.M. Molchanov. Icarus. 1969. V.11. 88-92.

7. Henon,M. A comment of "The resonant structure of Solar system" by A.M. Molchanov. Icarus. 1969. V.11. 93-94.

8. Баренбаум А.А. Многочастотный параметрический резонанс в системах спутников планетгигантов. IV съезд астрономического общества. Труды ГАИШ. М.: МГУ, 1998. С.292-299.

9. Баренбаум А.А. Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчиненные процессы и эволюция. М.: ГЕОС. 2002. 393 с.

10. Баренбаум А.А., Гладенков Ю.Б., Ясаманов Н.А. Геохронологические шкалы и астрономическое время. Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2002. Т.10. №2. С.3-14.

11. Баренбаум А.А. Ответ на статью Ю.А. Склярова «О галактическом варианте геохронологической шкалы». Стратиграфия. Геологическая корреляция. 2005. Т.13. №5. С.135-139.

12. Баренбаум А.А. Галактоцентрическая парадигма в геологии и астрономии. М.: ЛИБРОКОМ. 2010. 546 с.

13. Баренбаум А.А. Данные геологии и метеоритики как необходимый инструмент разработки адекватной спиральной модели Галактики. Труды ВЕСЭМПГ-2018. М: ГЕОХИ РАН. 2018. С.294-298.

14. Баренбаум А.А., Титоренко А.С. Галактическая модель геологической цикличности: оптимизация параметров и тестирование по данным геологии и астрономии. Труды ВЕСЭМПГ -2020. М.: ГЕОХИ РАН. 2020. С. 210-215.

15. Баренбаум А.А., Титоренко А.С. Оптимизированная галактическая модель: следствия для астрономии, астрофизики и космогонии. Тезисы докладов «ФизикА.СПб-2021»— СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2021, 22-23.

16. Баренбаум А.А. Суперконтинентальная цикличность как следствие бомбардировок Земли галактическими кометами в спиральных рукавах Галактики. Труды ВЕСЭМПГ-2022. М.: ГЕОХИ РАН. 2022, 258-264.

17. Barenbaum, A.A. Measuring the precession period of Solar System ecliptic plane using galactic model. 13 Moscow Solar System Symposium-2022. Book of abstracts. IKI RAS. 2022. 13MS3-GP-PS-04, 211-214.

СКОРОСТИ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОСТИ ПОД ПЛАВАЮЩИМ ПРОДОЛЬНО СЖАТЫМ УПРУГИМ ЛЬДОМ ПРИ НЕЛИНЕЙНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЕРИОДИЧЕСКИХ ВОЛН

А.А. Букатов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия

<u>newisland@list.ru</u>

Цель исследования – изучить влияние ледового сжатия на составляющие скорости движения жидкости под плавающим ледовым покровом при распространении волны, сформированной при нелинейном взаимодействии волновых гармоник.

В результате решения задачи о нелинейном взаимодействии прогрессивных поверхностных волн в бассейне конечной глубины с плавающим продольно сжатым упругим льдом получены выражения для возвышения поверхности лед-жидкость и потенциала скорости движения жидких частиц с точностью до величин третьего порядка малости [1]. Выражение для потенциала скорости имеет следующий вид:

$$\varphi = a\sqrt{g/k}\sum_{n=1}^{2} b_{1n}chnk(z+h)sin\theta + a^{2}\sqrt{kg}(\sum_{n=3}^{4} b_{2n}chnk(z+H)sin\theta + b_{20}t) + a^{3}\sqrt{kg}(\sum_{n=3}^{6} b_{3n}chnk(z+H)sin\theta + b_{30}t), (1)$$

где

$$\begin{split} \theta &= kx + \sqrt{kg}(\tau + ak\sigma_1 + a^2k^2\sigma_2)t, \tau^2 = (1 + D_1k^4 - Q_1k^2)(1 + \kappa kthH)^{-1}thH, \ D_1\frac{D}{\rho g}, D = \\ \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \ Q_1 &= \frac{Q}{\rho g}, \\ \kappa &= h\frac{\rho_1}{\rho}. \end{split}$$

Здесь Q, E, h, ρ_1 , ν соответственно – продольное сжимающее усилие, модуль нормальной упругости, толщина, плотность, коэффициент Пуассона льда; ρ – плотность жидкости, g – ускорение силы тяжести. Переменные b_{1n} , b_{2n} , b_{3n} , b_{20} , b_{30} , σ_1 , σ_2 – известны [1].

Горизонтальная (*u*) и вертикальная (*w*) составляющие скорости движения однородной жидкости с учетом формулы (1) с точностью до величин третьего порядка малости определяются из выражений:

$$\begin{split} u &= a\sqrt{kg}\sum_{n=1}^{2}nb_{1n}chnk(z+h)cosn\theta + a^{2}k\sqrt{kg}\sum_{n=3}^{4}nb_{2n}chnk(z+h)cosn\theta + a^{3}k^{2}\sqrt{kg}\sum_{n=3}^{6}nb_{3n}chnk(z+H)cosn\theta, \\ w &= a\sqrt{kg}\sum_{n=1}^{2}nb_{1n}shnk(z+h)sinn\theta + a^{2}k\sqrt{kg}\sum_{n=3}^{4}nb_{2n}shnk(z+h)sinn\theta + a^{3}k^{2}\sqrt{kg}\sum_{n=3}^{6}nb_{3n}shnk(z+H)sinn\theta. \end{split}$$

Полученное решение справедливо вне малых окрестностей резонансных значений волновых чисел k_i ($i = 1 \dots 4$) [1].

Для оценки влияния характеристик ледового покрова на скорости волновых течений подо льдом численные расчеты выполнялись при $\rho_1/\rho = 0.87$, $\nu = 0.34$, $0 \le h \le 2$ м, E = 0; $5 \cdot 10^8$; 10^9 ; $3 \cdot 10^9$ Н/м² и условии $Q_1 < 2\sqrt{D}$, необходимом для устойчивости плавающего ледового покрова [2].

Получено, что сжимающее усилие обуславливает уменьшение фазы и максимальных значений составляющих скорости движения жидкости. Изменение знака амплитуды второй взаимодействующей гармоники проявляется в существенной трансформации профиля и влиянии на фазу сформированного возмущения при учете нелинейности вертикального ускорения льда. При фиксированном значении силы сжатия уменьшение жесткости ледяного покрова приводит к заметному отставанию фазы колебания.

Распределение максимальных по длине волны величин отношения вертикальной и горизонтальной составляющих скорости по волновому числу в диапазоне малых волновых чисел не является монотонным — заметно проявление сжимающего усилия и влияние знака амплитуды второй взаимодействующей гармоники, в сравнении с линейным случаем. Для заданной длины волны наблюдается различие в величинах отношения для случаев открытой поверхности, битого льда и сплошного продольно сжатого упругого льда. С увеличением глубины бассейна существует значение глубины, с которого для всех рассмотренных случаев отношения вертикальной и горизонтальной составляющих скорости остаются практически постоянными и меньше единицы.



Рисунок 1. Распределение составляющих скорости движения жидкости в условиях ледового сжатия $Q_1 = \sqrt{D}$ (толстые линии) и при его отсутствии $Q_1 = 0$ (тонкие линии) для случая $a_1 > 0$ (a) и $a_1 < 0$ (b) при $\lambda/H = 0,69$. Штриховые линии – с учетом вертикального ускорения льда, сплошные – без учета

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0004.

Литература/References:

1. Букатов А.А. Нелинейные колебания плавающей продольно сжатой упругой пластинки при взаимодействии волновых гармоник конечной амплитуды // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2019, № 2, С. 48–58. doi: 10.1134/S056852811902004Х.

2. Букатов А.Е. Волны в море с плавающим ледяным покровом. Севастополь: ФБГУН МГИ, 2017. 360 с.

ВЛИЯНИЕ НЕПРОНИЦАЕМЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОРИСТОЙ СРЕДЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА

Н.А. Юдочкин, А.А. Таирова, Г.В. Беляков

Институт динамики геосфер им. М.А. Садовского РАН

Движение фильтрационных потоков в пористых скелетах рассматривается в различных областях научных и прикладных направлений. Одним из таких направлений является изменение физико-механических характеристик среды при насыщении и расклинивание трещины в горной породе для увеличения отдачи углеводородов из коллектора [1]. На примере петрографических данных горной бороды с глубины 3 км [2] коллектор может быть сложен из: 70-90% обломочного материала из зерен и полевого шпата; 7-15% цемента из глинистых минералов; 7-10% пустотного пространства. Упругие константы для данных материалов имеют близкие значения и составляют: модуль Юнга Е≈30*103 МПа и коэффициент Пуассона µ≈0,3.

В экспериментальной работе представлена картина обтекания непроницаемых включений потоком вязкой жидкости в пористой среде. Оценены величины напряжений пористой среды, возникающих вблизи включения. Визуализация процессов, происходящих при деформировании пористой среды, позволяет оптимизировать методы, в которых применяется нагнетание вязкой жидкости для изменения механических свойств пласта.

Эксперименты были проведены на экспериментальной установке [3]. Процентное отношение обломочного материала к сумме цемента и пустот было уменьшено для более

наглядного представления взаимодействия фильтрационного потока и пористого скелета. Цемент и пустотное пространство имитировал пористый материал из полиуретана с пористостью 0,98. Обломочный материал представлен непроницаемым включением с близкими упругими характеристиками единицы скелета: модуль Юнга Е≈5 МПа и коэффициентом Пуассона 0,45.

В настоящей работе для демонстрации изменения напряженно-деформированного состояния представлены 3 эксперимента, которые были проведены при постоянном давлении 300 кПа и вязкости жидкости 0,35 Па*с. В первом эксперименте непроницаемое включение отсутствовало (Рисунок 1А). Нами была получена картина деформаций скелета без включения. Во втором эксперименте включение располагалось попрек нагнетаемого потока с перекрытием пористой среды около 50% (Рисунок 1Б). В третьем эксперименте включение располагалось вдоль потока (Рисунок 1В). Результатами являются напряжения скелета вблизи включения.



Рисунок 1. Расположение включений

Оценка напряжений, возникающих под действием фильтрационного потока внутри пористой среды, была произведена по изменениям положения сетки, заранее нанесенной на скелет по закону Гука и с учетом состояния пористой среды до нагнетания вязкой жидкости.

Изменение напряженно-деформированного состояния под действием фильтрационного потока в ходе эксперимента происходит внутри пористой среды и не оказывает значительное влияние на включение.

Градиент давления, возникающий в пористой среде вблизи включения, имеет схожесть с градиентом давления при обтекании препятствия потоком вязкой жидкости при малых числах Рейнольдса. [4]

Разрушение скелета происходит в результате сдвиговых напряжений на граничащих поверхностях скелета и включения.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122032900167-1).

Литература/References:

1. Калачев В.А., Панфилов П.Е., Зайцев Д.В. Об особенностях роста трещин в вязкоупругой среде с развитой иерархической структурой. // Вектор науки ТГУ 2017. №3(41) С.59-64.

2. Корюков, А. Ю. Петрографическое изучение пород пласта БТ13 Русско-Реченского месторождения // Вестник науки. – 2022. – Т. 1, № 2(47). – С. 159-162. – EDN GDGYIT.

3. Торрес Т.М., Юдочкин Н.А., Таирова А.А., Беляков Г.В. ФИЛЬТРАЦИЯ ЖИДКОСТИ В СРЕДЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ПРОНИЦАЕМОСТЬЮ. Динамические процессы в геосферах. 2022;14(2):52-61. https://doi.org/10.26006/29490995_2022_14_2_52.

4. Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. М.: Мир, 1986, 184 стр.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЯЧИХ ИЗГИБНО– ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН

В.А. Калиниченко

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

kalin@ipmnet.ru

Представлены новые результаты лабораторных экспериментов по исследованию влияния плавающей тонкой пластины на регуляризацию стоячей гравитационной волны Фарадея на свободной поверхности воды в прямоугольном сосуде. Показано, что увеличение толщины пластины существенно сказывается как на собственной частоте колебаний гидроупругой системы, так и на форме профилей наблюдаемых стоячих изгибно-гравитационных волн. При толщине пластины ниже критического значения форма волны описывается теорией нелинейных гравитационных волн; при больших толщинах следует использовать в качестве аппроксимирующих зависимостей приближение «сухой балки».

Эксперименты [1] по изучению эффекта плавающей пластины на разрушение и регуляризацию гравитационной волны Фарадея на свободной поверхности воды в прямоугольном сосуде показали, что стоячие изгибно-гравитационные волны в исследуемой гидроупругой системе (плавающая пластина – вода) определяются толщиной пластины: при малой толщине превалирует гравитационная волна, при большой – волна изгибная.

Возбуждаемые при параметрическом резонансе колебания жидкости (гравитационные волны) обуславливают изгибные колебания пластины за счет работы обобщенных гидродинамических сил со стороны гравитационной волны. Интерпретация данных эксперимента [1] в рамках линейной теории упругости [2, 3] позволила оценить энергозатраты гравитационной волны на изгиб пластины и ее критическую толщину, при которой колебания гидроупругой системы отсутствуют. Плавающую пластину можно рассматривать как своеобразный диссипативный элемент для волн гравитационных; именно энергозатратами на поддержание изгибных колебаний пластины определяется регуляризация разрушающихся волн Фарадея.

Цель настоящей работы – исследование в условиях лабораторного эксперимента частотных характеристик гидроупругой системы, определяемых толщиной и свойствами материала плавающей пластины, а также сравнение профилей гравитационных и изгибно-гравитационных волн. Полученные результаты могут способствовать решению прикладной проблемы определения толщины ледового покрова по частоте изгибно-гравитационных волн в маргинальной зоне океана [4].





Рисунок 1. (а) Разрушающаяся волна на свободной поверхности воды глубины h = 15 см и (б) регулярная изгибно-гравитационная волна высоты H = 13 см, толщина пластины h_p=0.5 см: частоты волн $\omega = 10.10 \text{ c}^{-1}$; скорость съемки 30 к/с; огибающие получены при наложении 60 кадров (три периода волны) Аналогично [1] влияние плавающей пластины на колебания жидкости исследовалось для второй моды (n = 2) двумерных стоячих гравитационных волн Фарадея на свободной поверхности

воды в прямоугольном сосуде длиной L = 50 см и шириной W = 4 см. В экспериментах использовались пластины из пенополиэтилена и пенополистирола.

Эксперименты показали, что наличие плавающей пластины на свободной поверхности воды приводит к регуляризации разрушающихся стоячих гравитационных волн – Рисунок 1.

Для двух значений глубины воды h = 5 и 15 см на рисунке 2 а представлены экспериментальные зависимости собственной частоты стоячей изгибно-гравитационной волны от толщины плавающей пластины из пенополиэтилена (1, 2) и пенополистирола (3). Видно, что с ростом h_p частота ω увеличивается, причем нижняя граница диапазона изменения толщины определяется значением $h_p = 0$ (гравитационные волны), а верхняя граница – критической толщиной $h_p = 1.8$ см, при превышении которой колебания гидроупругой системы отсутствуют.



Рисунок 2. (а) Зависимость собственной частоты изгибно-гравитационных волн от толщины пластины при глубине воды h = 5 и 15 см: 1, 2 – пенополиэтилен; 3 – пенополистирол; кривые – расчет. (б) Зависимость измеренной предельной высоты регулярной изгибно-гравитационной волны от h_p при глубине воды h = 15 см: 1 – гравитационная волна (h_p = 0); 2 – гидроупругая система (вода – плавающая пластина из пенополиэтилена)

Данные на Рис. 2 б показывают, что размещение пластины на свободной поверхности воды значительно изменяет предельную высоту волны. Если предельная высота гравитационной волны (1) оценивается как $H \sim 12$ см, то при увеличении h_p сначала наблюдается рост H, причем максимальное значение $H \sim 20$ см достигается при $h_p^* \sim 0.5-0.6$ см. Дальнейшее увеличение h_p приводит к уменьшению высоты H волны, которая при $h_p = 1.8$ см составляет всего 9.7 см. Отметим, что отвечающее максимальной высоте волны значение толщины пластины h_p^* определяет переход от гравитационных волн к волнам изгибным.

На рисунках 3 а, б для двух глубин жидкости приведены профили волн максимального развития при $h_p = 1$ см. Из сравнения их с чисто гравитационными волнами (в, г) следует, что для изгибно-гравитационных волн отсутствуют асимметрия профиля и заострение гребня.

Для описания профиля стоячих гравитационных волн (Рисунки 3 з, ж) использовались переменные Лагранжа. Применение нелинейной теории волн [5, 6] для изгибно-гравитационных волн дает отрицательный результат при сопоставлении с данными эксперимента – пунктирные кривые на Рис. 3 д, е, причем наиболее сильно профили отличаются в случае малой глубины жидкости (е). Для определения профиля двумерных изгибно-гравитационных волн использовалась функция $y(x) = A_1 sinkx + A_2 coskx + A_3 shkx + A_4 chkx$, которая в теории упругости выражение описывает изгибные колебания балки со свободными концами в вакууме – «сухая балка».

Анализ волновых профилей изгибно-гравитационных волн показал, что при толщине пластины ниже критического значения h_p^* форма волны описывается теорией нелинейных





Аппроксимирующая функция для изгибно-гравитационных волн: $y(x) = A_1 sinkx + A_2 coskx + A_3 shkx + A_4 chkx$.

гравитационных волн; при больших толщинах следует использовать в качестве аппроксимирующих зависимости приближения «сухой балки» или решение соответствующей задачи гидроупругости.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена по теме государственного задания № 123021700044-0.

Литература/References:

1. Калиниченко В.А. Эксперименты по подавлению интенсивных колебаний жидкости плавающей пластиной. Изв. РАН. МЖГ. 2021. 6: 74–83.

2. Хейсин Д.Е. Динамика ледяного покрова. Л.: Гидрометеоиздат, 1967. 215 с.

3. Robin G.D.Q. Wave propagation through fields of pack ice // Philos. Trans. R. Soc. A:1963. V. 255. No. 1057. P. 313–339.

4. Dethloff K. et al. Arctic sea ice anomalies during the MOSAiC winter 2019/20. Cryosphere. 2022. 16: 981-1005.

5. Секерж-Зенькович Я.И. К теории стоячих волн конечной амплитуды на поверхности тяжелой жидкости. Докл. АН СССР. 1947. 8 (4): 551-553.

6. Нестеров С.В. Параметрическое возбуждение волн на поверхности тяжелой жидкости. Морские гидрофиз. исследования. 1969. 3(45): 87-97.

ДИНАМИКА ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА У ЗЕМЛИ В БАССЕЙНЕ НИЖНЕГО ДОНА ЗА ПЕРИОД 1966–2020 ГГ

А.В. Парфенова^{1,2}, В.В. Кулыгин², А.Р. Иошпа¹

¹Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Ростовская область, Россия ²Федеральный исследовательский центр Южный научный центр, Ростов-на-Дону, Ростовская область. Россия

aioshpa@vandex.ru

1.Аннотация.

В Российской Федерации наблюдаются изменения в динамике метеопараметров, бассейн Нижнего Дона – важный экономический и транспортный узел юга России – не исключение. Следствием таких флуктуаций является современный маловодный период. Материалом для написания стали многолетние данные, полученные из источников Росгидромета. В работе представлены результаты анализа динамики температуры воздуха за период 1966–2020 гг. Выявлено статистически значимое увеличение температуры воздуха после 1998 г. С использованием модели ступенчатых изменений выделены периоды, характеризующие наблюдаемые изменения.

2.Введение.

В Российской Федерации наблюдаются изменения в динамике метеопараметров. В качестве объекта исследования выбран бассейн Нижнего Дона – один из ключевых регионов юга Российской Федерации, в котором с 2007 г. наблюдается маловодный период. В [1] отмечается, что стало наблюдаться больше маловодных эпизоды, вследствие чего проходимость реки уменьшилась. В работе [2] указывается, что такое состояние реки негативно сказывается на судоходстве. Последствиями сложившийся ситуации наряду с ущербом различным отраслям хозяйственной деятельности является ухудшение состояния экосистемы Азовского моря.

Основная причина современного маловодного периода – это следствие климатических изменений. ВМО отмечает, что средняя глобальная температура в 2022 г. была выше на 1,15°С, чем в период 1850–1900 гг. [3]. Коэффициенты линейного тренда температуры колеблются от 0,18°С/10 лет (для Земли в целом) до 0,34°С/10 лет (для Северного полушария), а на территории Российской Федерации положительный тренд температуры воздуха составляет 0,45°С/10 лет. Для юга ЕТР также характерно потепление: 0,74°С/10 лет [4]. Все данные факторы актуализируют рассмотрение изменения температуры воздуха у земли в пределах бассейна Нижнего Дона.

3.Материалы и методы.

Источниками многолетних рядов приземной температуры воздуха стали данные 24 станций из архивов ВНИИГМИ-МЦД [5] за период 1966–2020 гг. Расположение и периоды наблюдений для каждой метеостанции представлены на рисунке 1. Для характеристики бассейна Нижнего Дона в первую очередь рассматривались 8 станций, расположенных на территории бассейна. Заполнение единичных пропусков месячных значений выполнялось на основе данных ближайших станций.

В качестве меры интенсивности изменений метеопараметров использовался коэффициент линейного тренда (построенный по углу наклона линии регрессии), его значимость определялась путем статистической проверки гипотезы о его равенстве нулю с помощью t-критерия Стьюдента с уровнем значимости 5%.

Для построения сеточных областей температуры использовались методы геостатистической интерполяции (обычный кригинг). Размер ячеек сеточной области выбран равный 30 км. Сеточные области, отражающие среднемесячные значения, строились для каждого месяца каждого года рассматриваемого периода.

Для уточнения динамики изменения линейного тренда использовалась модель ступенчатого изменения. Она представляет собой набор стационарных моделей для частей временного ряда, и характеризуется неизменностью во времени среднего значения и среднего квадратического отклонения для каждой части ряда [6]:

 $E_1(t_1) = const1, \sigma_1(t_1) = const1, (1)$

$$E_2(t_2) = const_2, \sigma_2(t_2) = const_2,$$

где E_1 , σ_1 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение первой части ряда при изменении t_1 от 1 до t_n , E_2 , σ_2 – среднее значение и среднее квадратическое отклонение второй части ряда при изменении t_2 от t_n +1 до n, а n – объем ряда.

Момент ступенчатых изменений (t_n) определялся при минимизации значения сумм квадратов отклонений двух частей временного ряда от модельных значений в ходе итерационной процедуры расширяющегося окна:

$$\sigma_1^2(n_1-1) + \sigma_2^2(n_2-1) \rightarrow min, (2)$$

где σ_1^2 и σ_2^2 — дисперсии, а n_1 и n_2 — объем каждого получившегося временного ряда. На каждом шаге процедуры расширяющего окна n_1 увеличивается на единицу, n_2 уменьшается, и производится расчет ошибки аппроксимации по (2). Начальное значение для n_1 (минимальный объем первой части ряда) был выбран равным 5 лет.

Проверка осуществлялась с помощью критерия Фишера, (оценивающего однородности дисперсий), а дополнительно оценивалась (их изменчивость) с помощью критерия Стьюдента. Уровень статистической значимости был выбран равный 5 %.



🔶 Станции за пределами бассейна

Рисунок 1. Расположение метеостанций в бассейне Нижнего Дона

Примечание: красным выделены станции, находящие в бассейне Нижнего Дона, желтым – вне бассейна.

4. Результаты.

Для исследования наличия монотонных изменений (линейного тренда) метеопараметров на метеостанциях, находящихся в пределах бассейна Нижнего Дона, были построены соответствующие линейные регрессионные зависимости от номера года.

Полученные параметры линейных регрессий для средних годовых и месячных температур указывают на потепление в пределах бассейна Нижнего Дона (таблица 1). Скорость повышения

осредненной по исследуемым метеостанциям среднегодовой температуры составила 0,4°С/10 лет. Наиболее быстрое потепление (0,5°С/10 лет) наблюдается на метеостанции Валуйки.

Табл. 1.

| | | | | | | | | | | |) | | |
|---------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|
| Станции | Год | **R | Φ | М | Α | М | И | И | Α | C | 0 | Н | Д |
| Богородицкое-Фенино | 0,4 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,2 | 0,1 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,5 |
| Харьков | 0,4 | 0,7 | 0,6 | 0,6 | 0,2 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,2 | 0,4 |
| Валуйки | 0,5 | 0,8 | 0,8 | 0,6 | 0,1 | 0,2 | 0,4 | 0,5 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,2 | 0,5 |
| Чертково | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | 0,1 | 0,4 |
| Цимлянск | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,1 | 0,2 | 0,5 | 0,5 | 0,6 | 0,4 | 0,5 | 0,0 | 0,2 |
| Ростов-на-Дону | 0,3 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | -0,1 | 0,0 | 0,3 | 0,3 | 0,5 | 0,3 | 0,3 | -0,1 | 0,1 |
| Гигант | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | -0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,6 | 0,4 | 0,4 | -0,1 | 0,2 |
| Ремонтное | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,7 | -0,1 | 0,1 | 0,5 | 0,4 | 0,5 | 0,3 | 0,4 | -0,1 | 0,2 |
| Среднее по станциям | 0,4 | 0,7 | 0,7 | 0,6 | 0,1 | 0,1 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,4 | 0,4 | 0,1 | 0,3 |

Коэффициенты линейного тренда температуры воздуха по месяцам и за год в бассейне Нижнего Дона за 1966–2020 гг., °C/10 лет.

Примечания: 1) Оранжевой заливкой выделены статистически значимые положительные коэффициенты, 2) Символ «**» — заглавные буквы названий месяцев с января по декабрь.

Что касается месячных изменений температуры, то самый сильный рост (0,8°С/10 лет) отмечается на метеостанциях Богородицкое-Фенино, Валуйки и Ремонтное в зимний период (январь и февраль), слабый значимый рост – в летне-осенний (0,3°С/10 лет). За год для почти всей территории бассейна тренд потепления значим на уровне 5%, за исключением апреля, мая, ноября и декабря. Также незначимые коэффициенты роста температуры отмечаются в январе, феврале на метеостанции Ростов-на-Дону и октябре на метеостанциях Ростов-на-Дону и Ремонтное. За вековой период величина потепления в Ростовской области, которая почти полностью находится в пределах бассейна Нижнего Дона, несколько меньше: коэффициент линейного тренда за период 1900–2020 гг. составляет в среднем 0,3°С/10 лет [7, 8], особенно сильно повышаясь в холодный период (0,69°С/10 лет) [9]. Одной из причин роста приземной температуры воздуха называют изменения в увеличении блокирующих процессов после 1988 года [10].

Для анализа пространственного характера изменений метеопараметров для каждого месяца каждого года за период 1966–2020 гг. в результате интерполяции были созданы сеточные области. Затем в каждой ячейки сеточной области строились регрессии, линейный коэффициент которых отображался на картосхеме.

Региональные коэффициенты тренда изменения приземной температуры воздуха представлены на рис. 2. Потепление наблюдается на всей территории бассейна, за исключением пары месяцев. В январе и феврале наблюдались максимальные скорости роста среднегодовой температуры (в пределах 0,75–0,1°C/10 лет), сильнее всего потепление проявлялось на севере и юге бассейна. В апреле, мае, ноябре и декабре не фиксируется значимых изменений приземной температуры за исследуемый период.

Дальнейшим работы направлены на решение проблем, связанных с разработкой методики проверки адекватности модельных расчетов в условиях ограниченного пространственновременного ряда имеющихся натурных данных, поскольку стандартные статистические методы не могут быть применимы ввиду малого объема референтных значений.



Рисунок 2. Коэффициенты тренда приземной температуры воздуха в бассейне Нижнего Дона по месяцам, °C/10 лет

Для подробного исследования характера наблюдаемых изменений в течение 1966–2020 гг. исследуемый временной промежуток был разделен на периоды на основе модели ступенчатых изменений. Для температуры границы периодов для всех станций, на которых удалось определить смену режима, показывают 2 одинаковых периода: 1966–1998 и 1999–2020 гг. Исключение – метеостанции Ростов-на-Дону, Гигант, Ремонтное.



Рисунок 3. Смена режима приземной температуры воздуха в бассейне Нижнего Дона за 1966–2020 гг., °С/период

Результаты разделения на периоды сравнивались с разделением по 30-летним периодам, которые рекомендованы ВМО для расчета климатических норм (рис. 4). Для наглядности полученные средние годовые значения за периоды по двум разделениями были объединены на одной диаграмме. На рисунке 4 представлены станции, характеризующие северо-запад (Богородицкое-Фенино) и юго-восток (Ремонтное) бассейна Нижнего Дона. На каждой диаграмме приведены две временные полосы: верхняя часть — это разбиение на периоды в рамках модели ступенчатых изменений, нижняя часть — это разбиение на 30-летние периоды



Рисунок 4. Сравнение средних значений за периоды для разбиения на 30-летние периоды и периоды, выделенные с помощью модели смены состояний, для станций Богородицкое-Фенино и Ремонтное

Сравнение средних значений обоих разбиений показало, что полученные значения, по большей части, идентичны и, в достаточной мере, отражают наблюдаемые изменения. Для данного метеопараметра модель ступенчатых изменений позволяет не только отследить тенденцию роста, но и установить границу начала изменений (1998 г.). Однако периоды, найденные с использованием модели ступенчатых изменений, отображают более реалистичную динамику исследуемого метеопараметра. Это указывает на зависимость статистических показателей малой выборки данных (до 100) от их объема. По этой причине лучше уточнять границы периодов на основе имеющихся данных с учетом их однородности.

5.Выводы.

В ходе исследования были проанализированы тенденции изменения температуры воздуха у земли за период 1966-2020 гг. По таблицам коэффициентов линейного тренда средних годовых и месячных значений приземной температуры воздуха отмечается статистически значимое повышение. Одной из основных причин изменений считается смена режимов крупномасштабной атмосферной циркуляции в начале 1970-х. Особенно сильный рост наблюдается для зимнего периода (январь и февраль). Это может негативно сказываться на сток реки: при высокой температуре нет условий для сформирования снега и промерзания необходимого слоя почвы для дальнейшего формирования водного потока в весенний период (половодье). Только в апреле, мае, ноябре и декабре не наблюдается статистически значимых изменений. Пространственные карты изменения температуры подтвердили наличие изменений метеопараметра, особенно на севере бассейна. С использованием модели ступенчатых изменений были определены моменты смены состояний, разбивающие весь рассматриваемый временной интервал на два периода (1966-1998, 1999–2020). Сравнение средних значений в пределах выделенных периодов и в пределах 30-летних периодов, рекомендованных ВМО для расчета климатических норм, показало, что полученные значения двух разбиений, по большей части, идентичны и, в достаточной мере, отражают наблюдаемые изменения. Однако периоды, найденные с использованием модели ступенчатых изменений, отражают более реалистичную динамику метеопараметров.

Литература/References:

1. Гладков Г.Л., Надеинская Н.И., Ярве П.А. Русловой режим и судоходные условия на нижнем Дону // Транспортное дело России, 2018. №5. С. 124–130.

2. Вовк В.Н. Ликвидация лимитирующих участков на внутренних водных путях / В. Н. Вовк // Транспорт Российской Федерации, 2015. №1(56). С. 3–6.

3. WMO annual report highlights continuous advance of climate change / WMO. 2023. URL: https://public.wmo.int/en/media/press-release/wmo-annual-report-highlights-continuous-advance-of-climate-change (дата обращения: 30.04.2023).

4. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2021 год, 2022. Москва, 2022. 104 с.

5. Булыгина О.Н. и др. Описание массива данных среднемесячной температуры воздуха на станциях России // Свидетельство о государственной регистрации базы данных. 2014. №2014621485.

6. Лобанов В.А. Учебное пособие по региональной климатологии. Учебное издание. СПб: РГГМУ, 2020. 170 с.

7. Дрововозова Т.И., Кириленко А.А. Влияние метеорологических факторов на качество природных водных объектов на территории Багаевской оросительной системы // Экология и водное хозяйство, 2021. Т. 3, №4. С. 1–13.

8. Лурье П.М. Региональные особенности изменения климата на юге России и их последствия (на примере Ростовской области) // Географические исследования Краснодарского края: Сборник научных. Краснодар: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Кубанский государственный университет", 2010. С. 83–9.

9. Комплексная оценка тенденций изменения климатических условий на среднесрочный (до 2020 года) и долгосрочный (до 2050 года) периоды для предупреждения возможных негативных последствий для окружающей среды и экономики области. Итоговый отчет по выполнению работ по государственному контракту. Санкт-Петербург, 2012. 95 с.

10. Кононова Н. К. Изменения циркуляции атмосферы Северного полушария в XX–XXI столетиях и их последствия для климата // Фундаментальная и прикладная климатология, 2015. Т. 1. С. 133–162.

АНАЛИЗ ПОЛЕЙ ТЕЧЕНИЙ И КОНЦЕНТРАЦИИ БЕРИЛЛИЯ-7 В ПРИБРЕЖНОМ РАЙОНЕ ЮЖНОГО БЕРЕГА КРЫМА ЛЕТОМ 2016 Г. ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Н.А. Евстигнеева, О.А. Дымова

ФГБУН ФИЦ «Морской гидрофизический институт РАН»

naevstigneeva@yandex.ru

Радиоактивные изотопы, такие как бериллий-7 (⁷Ве), являются информативными трассерами процессов, определяющих поступление и транспорт веществ в деятельном слое вод морей и океанов на различных временных масштабах. Т.к. численное моделирование позволяет реконструировать и анализировать эволюцию поля концентрации радионуклидов, то модели их переноса представляют большой интерес и используются, в частности, для оценки состояния и прогнозирования изменений экосистемы [1]. Необходимым условием для корректного воспроизведения эволюции поля радионуклидов является точная реконструкция гидродинамических полей, близких к наблюдаемым.

Данное исследование является продолжением развития трехмерной модели транспорта бериллия-7 в водах Черного моря, разработанной ранее в [2, 3], с целью более корректного описания пространственно-временной изменчивости концентрации радионуклида в прибрежной зоне. Основываясь на опыте предыдущих работ [4], выполнена реконструкция полей течений и концентрации бериллия-7 на участке Крымского шельфа с ультравысоким пространственным разрешением (~500 м по горизонтали) и ассимиляцией в модели доступных данных наблюдений (экспедиционные измерения температуры и солености, спутниковая температура поверхности моря) в летний период 2016 г.

Целесообразность применения более мелкого шага сетки при восстановлении мезо- и субмезомасштабных особенностей прибрежной циркуляции и распределения радионуклида показана на примере сравнения с полями, полученными с более грубым шагом сетки (~1.6 км). Два численных эксперимента было выполнено для периода июнь – июль 2016 г. по моделированию циркуляции и переноса бериллия-7: для Крымского участка шельфа и для всего бассейна. Выбор интервала обусловлен тем, что в это время в районе ЮБК проходила экспедиция №87 НИС «Профессор Водяницкий» [5] и проводились прямые измерения не только гидрологических характеристик, но и концентрации Ве7.

Эксперимент 1 проведен для области, расположенной между 33.37–36.46° в.д. и 43.99–45.15° с.ш. и охватывающей участок шельфа от мыса Херсонес до оконечности Керченского полуострова. Пространственное разрешение составляло 0.00696° по долготе и 0.005° по широте

(~560 м), по вертикали использовалось 27 z-горизонтов. На открытой части боковых границ для уравнений движения реализованы условия Дирихле (на каждый расчетный момент времени задавались компоненты скорости, рассчитанные по модели с более грубым разрешением). Температура и соленость задавались для участков границы, где вода втекала в область; для участков границы, где вода вытекала из области, для определения Т и S на открытой границе задавались условия Орланского [6]. Эксперимент 2 проведен для всего Черного моря на сетке с разрешением 0.020° и 0.015° по долготе и широте соответственно (~1.6 км), вертикальное разрешение аналогично эксперименту 1.

Анализ результатов эксперимента 1 показал, что в течение расчетного периода наблюдался поток струи Основного черноморского течения (ОЧТ) вдоль Крымского побережья. Между береговой линией и ОЧТ получены следующие особенности циркуляции. В верхнем 30-метровом слое между г. Ялта и м. Аю-Даг генерировался и перемещался по направлению движения ОЧТ антициклонический вихрь с радиусом около 20 км. С 9 по 18 июля отчетливо проявлялся антициклонический вихрь между 33.37 и 33.9° в.д. в верхнем 30-метровом слое. Антициклонические и циклонические вихри малых масштабов в верхнем слое вблизи м. Аю-Даг и м. Меганом могли генерироваться при обтекании ОЧТ береговой линии и неоднородностей рельефа дна.

В поле концентрации бериллия-7 воспроизведено повышенное содержание радионуклида в прибрежной зоне г. Ялта и в Феодосийском заливе. Пониженные значения выявлены на периферии ОЧТ и около м. Сарыч.

При анализе полей течений, рассчитанных в двух экспериментах, были отмечены некоторые качественные отличия в структуре полей, ряд вихревых образований в эксперименте с менее высоким разрешением отсутствовал или был выражен слабее, на верхних горизонтах удалось воспроизвести циркуляцию вдоль побережья более детально в эксперименте с более высоким разрешением. В качестве иллюстрации приведены поля для 29 июня 2016 г.

На рисунке 1а и рисунке 1б представлены поля течений, рассчитанные по модели с разрешением ~500 м на горизонтах 3 и 30 м (изображается каждая шестая стрелка), на рисунке 1в и рисунке 1г – поля течений, рассчитанные по модели ~1.6 км на горизонтах 3 и 30 м (изображается вторая каждая стрелка). При сравнении полей течений, представленных на рисунке 1, было получено качественное соответствие, однако за счет более мелкого шага сетки удалось уточнить структуру полей. На верхнем горизонте восстановлено антициклоническое вихревое образование в Ялтинском заливе, циклонический вихрь у м. Ай-Тодор, два антициклонических вихря у м. Меганом (рисунок 1а). На глубинном горизонте (30 м) более четко наблюдалось антициклоническое вихревое образование между 33.4 и 34° в.д. (рисунок 1в).

Сопоставление полей концентрации бериллия-7 по результатам двух расчетов показало, что обе модели дают качественно схожие данные: повышенные значения концентрации ⁷Ве, обусловленные адвективным переносом ОЧТ, наблюдаются в юго-восточной части полигона. На периферии ОЧТ значения концентрации понижены, а наибольшие отличия выявлены в прибрежной зоне. На рисунке 2 представлены поля концентрации бериллия-7 на 19.07.2016. Видно, что в районе поселков Гурзуф и Партенит повышенные концентрации ⁷Ве, по-видимому, связаны с атмосферными осадками (рис. 2в), а в Феодосийском заливе поле концентрации формируется субмезомасштабными процессами (рисунок 1а). Значительные отличия в прибрежной зоне обнаружены в районе м. Сарыч. По данным эксперимента 1 (рисунок 2б) здесь концентрация примерно в 1.5 раза ниже, чем в эксперименте 2 (рисунок 2а). При этом сопоставление результатов моделирования с данными наблюдений показало, что в мористой части оба эксперимента показывают близкие значения концентрации, попадающие в погрешность самих измерений, а вблизи берега эксперимент 1 дает более точные данные.



Рисунок 2. Поле концентрации ⁷Ве на горизонте 3 м по результатам эксперимента 2 (а), эксперимента 1 (б) и поле потока ⁷Ве из атмосферы (в) на 19.07.2016

Благодарности/Acknowledgments:

Анализ полей течений и концентрации бериллия-7 в зоне Южного берега Крыма с пространственным разрешением ~500 м выполнен при поддержке гранта РНФ 22-77-10056. Расчет гидрофизических полей Черного моря с пространственным разрешением ~1,6 км для Крымского участка шельфа проведен в рамках государственного задания по теме № FNNN-2021-0003 (шифр «Оперативная океанология»).

Литература/References:

1. Kadko D., Olson D., 1996. Beryllium-7 as a tracer of surface water subduction and mixed-layer history. Deep Sea res. Part I: Oceanogr. Res. Pap. 2 (43): 89-116.

2. Kremenchutskii D.A., Dymova O.A., Batrakov G.F. & Konovalov S.K., 2018. Numerical simulation of the intra-annual evolution of beryllium-7 (7Be) in the surface layer of the Black Sea. Environmental Science and Pollution Research. 11(25): 11120-11127.

3. Dymova O.A., Demyshev S.G., 2018. Computing complex for modeling the Black Sea. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 211 (1): 012082.

4. Демышев С.Г., Евстигнеева Н.А., Алексеев Д.В. и др., 2021. Анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции вод у берегов Западного Крыма на основе ассимиляции данных наблюдений в численной модели динамики Черного моря. Морской гидрофизический журнал. 37(1). 23-40.

5. Артамонов Ю.В., Скрипалева Е.А., Алексеев Д.В. и др., 2018. Гидрологические исследования в северной части Черного моря в 2016 г. (87, 89 и 91-й рейсы НИС «Профессор Водяницкий»). Морской гидрофизический журнал: 34(3). 247-253.

6. Orlanski I., 1976. A simple boundary condition for unbounded hyperbolic flows. J. Comput. Phys. V. 21(3): 251-269.

ВИБРАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ СИММЕТРИЗАЦИИ ЛАМИНАРНОГО ТЕЧЕНИЯ ВЯЗКОЙ НЕСЖИМАЕМОЙ ЖИДКОСТИ В ПЛОСКОМ ДИФФУЗОРЕ

А.И. Федюшкин, А.А. Пунтус

ИПМех РАН, г. Москва, Россия

<u>fai@ipmnet.ru</u>

Решение задачи о течении вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре при малых числах Рейнольдса было получено независимо Джеффри [1, 2] и Гамелем [3, 4] более ста лет назад. Известно, что течение вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре при малых числах Рейнольдса симметрично, но при увеличении чисел Рейнольдса выше критического Re* течение теряет симметрию, оставаясь стационарным, а при превышении Re** асимметричное течение становится колебательным, переходя затем в турбулентный режим. Изучение нелинейных режимов ламинарных течений жидкости и газа в диффузоре, например, таких, как асимметричность и перемежаемость потока, имеет большое фундаментальное и практическое значение. Однако перемежаемость и асимметрия ламинарных стационарных течений в диффузоре изучена недостаточно по сравнению с турбулентными режимами течения. Обзор работ по решению задачи Джеффри – Гамеля и обобщение на основе группового анализа даны в работе [5], где указывается о возможных неединственностях в стационарных решениях задачи Джеффри – Гамеля, то есть на возможность асимметричности и перемежаемости потока в жидкости в диффузоре. Авторами работ [6-7] были найдены обобщения решения задачи Джеффри-Гамеля, приведены одно-, двух- и трех-модовые бифуркационные решения, указывающие на наличие несимметричных стационарных решений (течений) для определенных диапазонов чисел Рейнольдса и углов раствора диффузора. В работе [8] численно показано влияние угла раствора и удлинения диффузора на асимметрию течения в плоском диффузоре и сказано, что наложение периодических вибраций на входной поток могут симметризовать поток, но это нуждается в более детальном исследовании. В работах [9-11] на основе численного решения уравнений Навье-Стокса для вязкой несжимаемой жидкости были изучены ламинарные симметричные и асимметричные стационарные и переходные режимы течения в плоском диффузоре с малым углом раствора и указаны диапазоны существования данных режимов течения жидкости в диффузоре в зависимости от значений числа Рейнольдса.

В данной работе показано влияние слабого гармонического вибрационного воздействии на скорость входного потока V_{inlet} вязкой несжимаемой жидкости в плоский диффузор с малым углом раствора β на симметризацию асимметричного течения, которое наблюдается при отсутствии вибрационного воздействия. В работе представлено два способа симметризации течения вязкой жидкости в плоском диффузоре: 1 – вибрационным воздействием на скорость входного потока, 2 – вибрационного воздействия на скорость течения со стороны твёрдых стенок диффузора по нормали к стенкам. Результаты численного моделирования показали, что

асимметричное течение в диффузоре можно слабыми периодическими воздействиями с интенсивностью менее 1% от интенсивности основного потока.

Приводятся результаты моделирования течения вязкой несжимаемой жидкости на основе численного решения уравнений Навье-Стокса для различных чисел Рейнольдса в диапазоне до 10^3 , различных амплитуд A и частот f при вибрационном периодическом воздействии на скорость потока на входе в диффузор V_{inlet} в виде: $V = V_{inlet} + Asin(2\pi ft)$. Показано, что вибрационные воздействия даже при амплитудах менее 1% от скорости V_{inlet} способны симметризовать течение в диффузоре. Приводятся мгновенные и осредненные по времени характеристики течений в виде профилей и изолиний скоростей.

Пример симметризации течения вязкой жидкости в плоском диффузоре с помощью вибрационного воздействием со стороны стенок диффузора V_n =Asin(2 π ft) (V_n – воздействие со стороны стенок по нормали) показано на рис. 1. На рис. 1 показаны профили средней по времени скорости (слева) и профили среднеквадратичного отклонения от безразмерной средней скорости (справа) для течения жидкости в плоском диффузоре для Re=279, A=0.001m/s, f=10Hz (Re_{vibr}=0.02), где число Рейнольдса на входе в диффузор определено, как Re = $V_{inlet} l_{in} / v$, где l_{in} , – длина дуги на входе в диффузор, а Re_{vibr} = Al_{in} / v - число Рейнольдса вибрационного воздействия, безразмерные координата $y_{dimless}$ =y/r sin (β /2), безразмерные компоненты скорости: Vx dimless=Vx/Vx_{inlet}, Vy dimless=Vy/Vx_{inlet}.



Рисунок 1. Профили средней по времени скорости (слева) и профили среднеквадратичного отклонения от средней скорости (справа) для течения жидкости в плоском диффузоре с вибрационным воздействием со стороны стенок диффузора для R_e =279, A=0.001m/s, f=10Hz (R_{eyihr} =0.02)

Отдельно показаны картины течений, создаваемые периодическим воздействием при $V_{inlet} = 0, A \neq 0$, и при отсутствии вибраций $V_{inlet} \neq 0, A = 0$. Также численным моделированием показан кольцевой эффект Ричарсона для периодического течения вязкой жидкости в диффузоре, который известен при периодическом течении в трубах [12].

Результаты численного моделирования показали два способа симметризации асимметричных ламинарных течений вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре при периодическом воздействии на скорость входного потока и при воздействии со стороны стенок диффузора.

Литература/References:

1. Jeffery G.B. The two-dimensional steady motion of a viscous fluid// Phil. Mag. 1915. Ser.6. V29. № 172, pp. 455–465.

2. Джеффри Дж. Б. Двумерное установившееся движение вязкой жидкости. Перевод с английского Д.В. Георгиевского (соредакторы перевода Л. Д. Акуленко, С. В. Нестеров). // Нелинейная динамика, 2009, Т.5, №1, 2009г., С.101–109.

3. Hamel G. Spiralformige Bewegungen zaher Flussigkeiten // Jahres her. Deutsch. Math. Ver. 1917. Bd 25. S. 34–60.

4. Гамель Г. Спиралевидные движения вязкой жидкости, Перевод с немецкого С. В. Нестерова (соредакторы перевода Л. Д. Акуленко, Д.В. Георгиевский). // Нелинейная динамика, Т.5, № 1, 2009г., С.111–133.

5. Пухначёв В.В. Симметрии в уравнениях Навье-Стокса // Успехи механики, 2006, Т. 4, № 1, С. 6–76.

6. Акуленко Л.Д., Георгиевский Д.В., Кумакшев С.А. Регулярно продолжаемые по числу Рейнольдса решения задачи Джеффри – Гамеля //Известия РАН. МЖГ. 2004. № 1. С. 15–32.

7. Akulenko L.D., Georgievskii D.V., Kumakshev S.A. (2017). Multi-mode Symmetric and Asymmetric Solutions in the Jeffery–Hamel Problem for a Convergent Channel. In: Altenbach, H., Goldstein, R., Murashkin, E. (eds) Mechanics for Materials and Technologies. Advanced Structured Materials, vol 46. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56050-2 1.

8. Majid Nabavi. Three-dimensional asymmetric flow through a planar diffuser: Effects of divergence angle, Reynolds number and aspect ratio. International Communications in Heat and Mass Transfer 37. 2010, pp. 17–20.

9. Федюшкин А.И. Переход течений вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре от симметричного к несимметричному и к нестационарному режимам // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. Том 17, вып. 3, 2016.

10. Федюшкин А.И., Пунтус А. А. Нелинейные особенности ламинарных течений жидкости на Земле и в невесомости // Труды МАИ. 2018. № 102.

11. Федюшкин А.И., Пунтус А.А., Асимметрия и перемежаемость ламинарного течения вязкой несжимаемой жидкости в плоском диффузоре. "Модели и методы аэродинамики". Материалы XXII международной школы-семинара, Сочи, 4–9 сентября 2022г. М.: -ЦАГИ. 2022, с. 82–84.

12. Richardson EG and Tyler E (1929) The transverse velocity gradient near the mouths of pipes in which an alternating or continuous flow of air is established Pros Phys Soc London V. 42, No 1: 7-14 DOI: 10.1088/0959-5309/42/1/302.

ВЛИЯНИЕ ГЕОСТРОФИЧЕСКИХ ТЕЧЕНИЙ НА ГЕНЕРАЦИЮ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ВНУТРЕННИМИ ВОЛНАМИ

Н.О. Анкудинов, А.А. Слепышев

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия ankudinff@gmail.com

Целью исследования является тонкая структура поля плотности, генерируемая инерционногравитационными внутренними волнами. Формой результата являются численные расчеты, решения краевых задач представляются в виде графиков.

Тонкая структура гидрофизических полей океана – наиболее загадочный объект, который имеет более чем полувековую историю исследования. Тонкая структура определяется мелкомасштабными динамическими процессами: турбулентностью, двойной диффузией, послойной конвекцией. Поскольку, например, природа турбулентности до конца не понята, то и природа тонкой структуры далека от полного понимания. Одним из источников генерации тонкой структуры являются внутренние волны, приводящие к вертикальным перемещениям водных масс и способствующие процессам перемешивания.

Уравнение для амплитуды вертикальной скорости находится из уравнений гидродинамики для волновых возмущений в приближении Буссинеска при учете вращения Земли в безграничном бассейне постоянной глубины на двумерном вертикально-неоднородном течении. В связи с тем, что это уравнение имеет комплексные коэффициенты, собственная функция и частота волны тоже являются комплексными, волновые потоки тепла, соли и массы у инерционно-гравитационных внутренних волн при наличии течения, у которого компонента скорости, перпендикулярная направлению распространения волны, зависит от вертикальной координаты, не равны нулю. Также был учтён и стоксов дрейф, который также вносит свой вклад. Решая краевую задачу для амплитуды вертикальной скорости, было найдено дисперсионное соотношение. Аналитическим путём были получены выражения для величин $\overline{\Delta \rho}$, которая представляет собой неосциллирующую на временном масштабе волны поправку к средней величине плотности – вертикальную тонкую структуру, генерируемую волной.

Неосциллирующая на временном масштабе внутренней волны поправка к плотности получена для слабонелинейного волнового пакета в работах [1, 2]. Она пропорциональна квадрату текущей амплитуды волны и невозмущенный профиль стратификации после прохождения волнового пакета восстанавливается, т.е. тонкая структура имеет обратимый характер.

Ранее уже было показано, что при учете вертикального волнового потока массы в поле инерционно-гравитационной внутренней волны генерируемая вертикальная тонкая структура сохранялась и после прохождения волны, т.е. имела необратимый характер. Сейчас же представляет интерес влияние горизонтальных градиентов плотности в геострофическом течении, когда эти градиенты выражаются через вертикальный сдвиг скорости течения из соотношений «термического ветра».

В результате были получены графики первых двух мод для потоков массы, тонкой структуры поля плотности, для внутренних волн с частотой 1, 4 и 12 цикл/ч. Расчеты показали, что вертикальные волновые потоки массы при учете горизонтальной неоднородности поля средней плотности возрастают, генерируемая тонкая структура тоже увеличивается по амплитуде.

Литература/References:

1. Борисенко Ю.Д., Воронович А.Г., Леонов А.И., Миропольский Ю. З. К теории нестационарных слабонелинейных внутренних волн в стратифицированной жидкости // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. – 1976. – Т.12, №3. – С. 293 – 301.

2. Воронович А.Г., Леонов А.И., Миропольский Ю.З. К теории образования тонкой структуры гидрофизических полей в океане // Океанология. – 1976. — Т. 11, вып.5. – С. 490 – 497.

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИКИ И БИОГЕОХИМИИ УСТОЙЧИВО СТРАТИФИЦИРОВАННОГО ВНУТРЕННЕГО ВОДОЕМА С ПРИМЕНЕНИЕМ МОДИФИЦИРОВАННОГО ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА

Д.С. Гладских^{1,2,3}, Е.В. Мортиков^{2,3,4}

¹Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия ² Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия ³Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия ⁴Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия <u>daria.gladskikh@gmail.com</u>

Озера и водохранилища являются важнейшими элементами многих природных ландшафтов, определяя их уникальные особенности. Процессы, протекающие в них, представляют, с одной стороны, самостоятельный интерес в рамках задач гидрологии и экологии, а с другой – являются важным аспектом в глобальных задачах метеорологии и климатологии, таких, как изучение климата Земли и оценки его изменений. При этом следует отметить, что формирование вышеназванных характеристик во многом определяятся процессами турбулентного переноса

(импульса, тепла и растворенных газов). Таким образом, встает вопрос о разработке корректного описания турбулентности в замкнутых водных объектах.

В рамках исследования, использовалась разработанная авторами настоящей работы, трехмерная модель термогидродинамики и биогеохимии внутреннего водоема на основе единого гидродинамического кода, объединяющего DNS-, LES- и RANS подходы для расчета геофизических турбулентных течений при высоком пространственном и временном разрешении например, [1-3]). Численная модель включает уравнения гидродинамики в (см., стратифицированном турбулентном вращающемся слое жидкости в приближении мелкой воды, а также уравнения для переноса тепла и солености с учетом горизонтальной и вертикальной диффузии. Описание биогеохимических процессов в модели включает в себя уравнения для расчета концентраций и потоков биохимических веществ. Ввиду объединения блоков динамики и биогеохимии обеспечивается воспроизведение моделью двусторонних связей, таких как вклад биопродуктивности за счет фотосинтеза в коэффициент экстинкции проникающей радиации. Для описания газообмена использована т.н. «модель обновления поверхности» [4], учитывающая турбулентные процессы, которые влияют на перемешивание около раздела воздух-вода. Входящий в нее член, отвечающий за диссипацию турбулентной кинетической энергии, рассчитывается из предложенного исполнителями проекта модифицированного замыкания, учитывающего двустороннюю трансформацию кинетической и потенциальной энергий турбулентных пульсаций [5-6].

С использованием модели проведены расчеты циркуляции Рыбинского водохранилища (Рисунок 1) и иных водных объектов.



Рисунок 1. Мгновенные распределения температуры (слева) и концентрации кислорода (справа) на поверхности Рыбинского водохранилища

Показано, что модель корректно описывает протекающие в водном объекте физические и биогеохимические процессы, а полученные численные результаты согласуются с наблюдаемыми натурными характеристиками.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-27-00002.

Литература/References:

1. Mortikov E.V. Numerical simulation of the motion of an ice keel in stratified flow // Izv. Atmos. Ocean.Phys. 2016. V. 52. P. 108-115.

2. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. 2019. V. 34, № 2. P.1-14.

3. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего смешанного слоя. // Водные ресурсы. 2019. 18 стр. (принята к печати).

4. Sally MacIntyre, Anders Jonsson, Mats Jansson, Jan Aberg, Damon E. Turney, and Scott D. Miller. Buoyancy flux, turbulence, and the gas transfer coefficient in a stratified lake // Geophysical Research Letters, 37(24), December 2010.

5. Соустова И.А., Троицкая Ю.И., Гладских Д.С., Мортиков Е.В., Сергеев Д.А. Простое описание турбулентного переноса в стратифицированном сдвиговом потоке применительно к описанию термогидродинамики внутренних водоемов // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2020. Т. 56, № 6. С. 689-699.

6. Gladskikh D.; Ostrovsky L.; Troitskaya Y.; Soustova I.; Mortikov E. Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 136. https://doi.org/10.3390/jmse11010136.

ПОГРЕШНОСТЬ АЛЬТИМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ УРОВНЯ МОРЯ, ВЫЗВАННАЯ НЕЛИНЕЙНОСТЬЮ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН

А.С. Запевалов

Морской гидрофизический институт РАН, Севастополь, Россия <u>sevzepter@mail.ru</u>

Изменчивость состояния морской поверхности является основным физическим механизмом, который влияет на определение уровня моря при альтиметрических измерениях с космических аппаратов. Одна из составляющих ошибки определения уровня моря, которую принято обозначать SB (*англ.* skewness bias), вызвана отклонением распределения возвышений морской поверхности от нормального распределения. Отклонение приводит к тому, что медиана статистического распределения возвышений морской поверхности не совпадает со средним уровнем поверхности [1].

Анализ SB выполнен на основе данных волновых измерений, проведенных на стационарной океанографической платформе Морского гидрофизического института. Методика измерений и измерительная аппаратура описаны в работе [2]. Особенности ветрового режима в районе платформы описаны в работах [3, 4]

Форма отраженного от морской поверхности импульса альтиметра описывается моделью Брауна (Brown) [5]

 $V(t) = \chi(t) * s(t) * q(t),$

где t – время; $\chi(t)$ – форма импульса, отраженного от плоской поверхности; символ * означает свертку; s(t) – форма зондирующего импульса; функция q(t) получена путем замены переменной функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности с помощью соотношения $\eta = ct/2$, где η – возвышение; с – скорость света.

Если аппроксимация функции плотности вероятностей возвышений морской поверхности, заданна с помощью усеченного ряда Грама-Шарлье, то функция q(t) имеет вид

$$q(t) = \frac{\exp\left(-\frac{t}{2D_S}\right)}{\sqrt{2\pi D_S}} \left[1 - \frac{A_{\eta}}{6}H_3\left(\frac{t}{\sqrt{D_S}}\right) + \frac{E_{\eta}}{24}H_4\left(\frac{t}{\sqrt{D_S}}\right)\right],$$

Где $D_S = (4/c^2)D_{\eta}$, D_{η} – дисперсия возвышений морской поверхности; H_{η} – полиномы Чебышева-Эрмита порядка *n*; A_{η} и E_{η} коэффициенты асимметрии и эксцесса. Форму отраженного импульса определяют три параметра: A_{η} , E_{η} , и D_{η} , характеризующие состояние морской поверхности.

Обычно при параметрическом расчете ошибок измерения уровня учитывается его зависимость от двух параметров: значительной высоты $H_S = 4\sqrt{D_{\eta}}$ и скорости ветра U_{10} на высоте 10 м. В

работе [1] предложено рассматривать третий предиктор, используя для этого средний период доминантных волн *T*₀.

Традиционно для параметризации нелинейных эффектов в морских волнах используются два безразмерных параметра, это крутизна ε и обратный возраст волн ζ

$$arepsilon = \sqrt{D_\eta} k_0,$$
 и $\zeta = U_{10}/C_0$

где k_0 – волновое число пика волнового спектра; C_0 – фазовая скорость волн с волновым числом k_0 . Представляется целесообразным рассмотреть зависимость SB от этих параметров. Как и T_0 параметры ε и ζ могут быть рассчитаны по данным дистанционного зондирования.

Ошибка определения уровня, обусловленная нелинейностью морских волн, равна [6]

$$SB = (c/2)\Delta t$$

где Δt – разности расчетного времени прихода импульса, отраженного от идеализированной гауссовой поверхности и от морской поверхности. Расчет Δt осуществляется в рамках модели Брауна при параметрах (высота орбиты, ширина диаграммы направленности антенны и др), соответствующих альтиметру, установленному на космическом аппарате SEASAT-1 [7].

Численное моделирование с использованием данных прямых волнографических измерений показал, что для Черного моря значения ошибки измерения уровня моря SB, вызванной нелинейностью поверхностных волн, в основном лежат в пределах от -0.2 см до 1.6 см. Эти оценки получены в условиях, когда значительная высота волн в основном не превышала 1.5 м, $maxH_S = 2.5$ м. Наиболее высокая корреляция наблюдалась между SB и крутизной волн ε , что указывает на целесообразность использования этого параметра в качестве дополнительного предиктора. В качестве второго дополнительного предиктора может быть использован обратный возраст волн ζ .

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания по теме FNNN-2021-0003 «Развитие методов оперативной океанологии на основе междисциплинарных исследований процессов формирования и эволюции морской среды и математического моделирования с привлечением данных дистанционных и контактных измерений».

Литература/References:

1. Pires N., Fernandes, M., Gommenginger C., Scharroo R., 2016. A conceptually simple modeling approach for Jason-1sea state bias correction based on 3 parameters exclusively derived from altimetric information. Remote Sensing. 8(7): 576.

2. Запевалов А.С., Большаков А.Н., Смолов В.Е., 2009. Исследование уклонов морской поверхности с помощью массива волнографических датчиков. Океанология. 49(1): 37-44.

3. Solov'ev Yu.P., Ivanov V.A. 2007. Preliminary results of measurements of atmospheric turbulence over the sea. Physical Oceanography. (3): 154-172.

4. Efimov V.V., Komarovskaya O.I., 2019. Disturbances in the wind speed fields due to the crimean mountains. Physical Oceanography. 26(2): 123-134.

5. Brown G.S., 1977. The average impulse response of a rough surface and its applications. IEEE Trans. Antennas Propagat. Vol. AP-25, pp. 67-74.

6. Запевалов А.С., Гармашов А.В., Князьков А.С., 2022. Влияние нелинейности поверхностных волн на точность альтиметрических измерений уровня моря. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 19(2): 193-200.

7. Hayne G.S. 1980. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering. IEEE Trans. Antennas Propagat. AP-28: 687-692.

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ В КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА ПРИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В.И. Карев, Ю.Ф. Коваленко, К.Б. Устинов

ИПМех РАН, Россия, 119526 Москва, пр-т Вернадского, 101

<u>wikarev@ipmnet.ru</u>

Подземное хранилище газа (ПХГ) – это комплекс инженерно-технических сооружений в пластах-коллекторах геологических структур, предназначенных для закачки, хранения и последующего отбора газа. Режимы эксплуатации ПХГ существенно отличаются от режимов эксплуатации месторождений углеводородов. В первую очередь это связано с циклическим сезонным изменением пластового давления в коллекторах ПХГ при закачке/отборе газа. Причем колебания пластового давления в состояниях минимальной и максимальной насыщенности составляют десятки процентов от среднего пластового давления.

Эффективность эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) определяется продуктивностью эксплуатационных скважин в циклах отбора и их приемистостью в циклах закачки газа, а также длительностью межремонтного периода, величина которого в основном связана с интенсивностью разрушения призабойной зоны пласта (ПЗП), которая приводит к выносу песка в скважину и абразивному износу подземного оборудования.

Основная гипотеза возникновения пескопроявления, принятая многими исследователями, связана с разрушением породы в ПЗП, когда напряжения превышают предел прочности [1-9]. В этой связи в качестве основного направления предупреждения разрушения ПЗП обычно предлагается снижение депрессии в скважинах.

Однако геомеханический анализ и данные натурных наблюдений, проведенные для ряда подземных хранилищ газа, показали, что ключевую роль в процессах разрушения коллектора играет другой фактор, а именно изменение пластового давления в залежи в целом, поскольку именно оно оказывает решающее влияние на величину напряжений, действующих в окрестности скважин, особенно на стадии максимального отбора газа.

Расчеты показали, что в результате изменения пластового давления исходное напряженное состояние в пласте, даже предполагаемое изначально равномерным сжатием, становится неравнокомпонентным – эффективные вертикальные и горизонтальные напряжения от горного давления будут различны. Следствием этого является существенное увеличение касательных напряжений в ПЗП.

Рассмотрим этот вопрос на примере горизонтальной скважины для случая равномерного природного поля напряжений. Механическое поведение породы можно описать уравнениями пороупругопластичности [10-13]. Они включают в себя уравнения равновесия, уравнения, выражающие связь полных и эффективных напряжений, уравнение фильтрационного течения, подчиняющегося закону Дарси, обобщенный закон Гука, записанный в терминах эффективных напряжений, уравнения, отражающие связь между смещениями и деформациями в рассматриваемом случае малых деформаций и поворотов. Для описания неупругого деформирования можно использовать вариант теории пластического течения с изотропным упрочнением.

Пусть коллектор ПХГ представляет собой протяженный, расположенный горизонтально пласт, толщины *h* много меньшей протяженности залежи *L*.

Предполагая исходное напряженное состояние равнокомпонентным, для исходного напряженного состояния имеем $\sigma_{ij}^0 = q \delta_{ij}$, где q - горное давление на данной глубине. Соответственно для исходных эффективных напряжений, действующих в грунтовом скелете пласта, имеем $S_{ij}^0 = \sigma_{ij}^0 + (1 - \delta)p_0\delta_{ij}$, где δ - доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета, p_0 - начальное пластовое давление. Изменение пластового давления приводит к появлению деформаций в пласте. При этом характер изменения граничных условий определяется геометрией пласта. На боковых (вертикальных) поверхностях ввиду большой протяженности пласта в своей плоскости граничные условия соответствуют постоянству

нормальных (горизонтальных) смещений $\Delta u_1 = \Delta u_2 = 0$ (оси 1 и 2 ориентированы в горизонтальной плоскости пласта). На горизонтальных поверхностях, постоянными сохраняются вертикальные напряжения $\Delta \sigma_3 = 0$. Подставляя эти выражения в закон Гука $S_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} + \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij}$ с учетом $S_{ij} = \sigma_{ij} + (1 - \delta)p\delta_{ij}$ (S_{ij} и ε_{ij} - эффективные напряжения и деформации, μ, λ постоянные Ламе) в предположении $\Delta S_1 = \Delta S_2$ получаем для зависимости главных эффективных напряжений в пласте от изменения пластового давления Δp_{nn} ($\Delta p_{nn} < 0$ при создании депрессии,

Капряжении в пла ($\Delta p_{\Pi \Lambda} > 0$ — репрессии) $S_1 = S_1^0 + \frac{v}{1-v} (1-\delta) \Delta p_{\Pi \Lambda}, S_2 = S_2^0 + \frac{v}{1-v} (1-\delta) \Delta p_{\Pi \Lambda}, S_3 = S_3^0 + (1-\delta) \Delta p_{\Pi \Lambda}.$ Здесь v -коэффициент Пуассона. Соответственно для полных напряжений от горного давления в пласте имеем $q_1 = q_2 = q - \frac{1-2v}{1-v} (1-\delta) \Delta p_{\Pi \Lambda}, q_3 = q.$

Таким образом, при закачке газа, когда пластовое давление становится выше начального, что отвечает $\Delta p_{nn} > 0$, полные напряжения в глубине пласта в горизонтальной плоскости $q_1 = q_2$ становятся по абсолютной величине больше полного напряжения в вертикальном направлении q_3 на величину $\frac{1-2v}{1-v}(1-\delta)\Delta p_{\Pi n}$. При отборе газа, когда пластовое давление становится ниже начального, что отвечает $\Delta p_{\Pi n} < 0$, полные напряжения в глубине пласта в горизонтальной плоскости $q_1 = q_2$ становятся по абсолютной величине меньше полного напряжения в 1-2vвертикальном направлении q_3 на величину $\frac{1-2v}{1-v}(1-\delta)\Delta p_{\text{пл}}$.

Изменение напряженного состояния в глубине пласта приводит к изменению напряжений, действующих в окрестности скважин. Как показано выше, при закачке и отборе газа первоначально равнокомпонентное природное состояние становится неравнокомпонентным, так что в пласте действуют горизонтальное напряжение q_1 и вертикальное напряжение q_3 , которые не равны между собой. Рассмотрим случай, когда в ходе отбора газа пластовое давление становится ниже начального, т.е. $p_{nn} < p_0$, поскольку в этом случае возникающие на контуре горизонтальной скважины сжимающие напряжения максимальны. В этом случае $|q_3| > |q_1|$ и решение может быть получено суперпозицией решений двух задач:

Задача 1 (задача Ламе [14]): всестороннее равномерное сжатие напряжениями q_1 и давление в скважине p_c , рисунок 1а.



Рисунок 1. Напряжения, действующие в окрестности горизонтальной скважины; а - равномерное сжатие напряжениями q_1 , давление в скважине $p_{
m c}$; б - одноосное сжатие в вертикальном направлении

апряжением (
$$q_3 - q_1$$
), $p_c = 0$

Задача 2 (аналог задачи Кирша [15]): одноосное сжатие в вертикальном направлении напряжением $(q_3 - q_1)$, давление в скважине нулевое, рисунок 16.

Суммарные сжимающие напряжения меняются по контуру скважины, так что напряжение σ_{θ} минимально в точке М и равно $\sigma_{\theta} = 3q_1 - q_3 + p_c$ и максимально в точке N и равно $\sigma_{\theta} = 3q_3 - q_1 + p_c$, здесь p_c - текущее пластовое давление. Таким образом, с точки зрения начала разрушения породы на контуре скважины наиболее опасна точка N.

Ниже для ряда ПХГ приведены результаты расчета напряжений σ_{θ} , действующих в точке N горизонтальных скважин при начальном пластовом давлении и минимальном пластовом давлении в конце отбора.

| ПХГ | $\sigma_{	heta}$ при начальном пластовом | $\sigma_{	heta}$ при минимальном пластовом давлении в |
|-------------|--|---|
| | давлении, МПа | конце отбора, МПа |
| Кущевское | 39,2 | 60,2 |
| Касимовское | 22,4 | 25,4 |
| Увязовское | 21,3 | 25,7 |
| Карашурское | 33,4 | 40,9 |
| Арбузовское | 33,2 | 42,7 |

На основании выполненных теоретических исследований были составлены программы нагружения образцов пород, по которым на установке ИСТНН было выполнено физическое моделирование деформационных процессов, протекающих в призабойной зоне пластов ПХГ при циклическом изменении пластового давления в процессе закачки/отбора газа. В результате для конкретных месторождений были определены максимально допустимые депрессии на забое скважин, не приводящие к разрушению породы в их окрестности и выносу песка в скважину.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ проект № 22-11-00273.

Литература/References:

1. Башкатов А.Д. Предупреждение пескования скважин. М.: Недра, 1981.

2. Врачев В.В., Шафаренко Е.Н., Шустров В.П. и др. Пескопроявление при эксплуатации ПХГ // Газовая промышленность. 1999. № 11. С. 62.

3. Гасумов Р.А., Варягов С.А., Серебряков Е.П. и др. Причины разрушения неустойчивых коллекторов и способы удаления песчаных пробок из скважин // Проблемы капитального ремонта скважин и эксплуатации ПХГ: сб. науч. тр. СевКавНИПИгаз. Ставрополь: РИЦ ООО «СевКавНИПИгаз», 2001. Вып. 34. С. 5–13.

4. Динков А.В., Ланчаков Г.А. Способ эксплуатации скважин, вскрывающих коллектора, сложенные песками и слабосцементированными песчаниками // Проблемы освоения месторождений Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. М.: Недра, 1998. С. 330–342.

5. Жуковский К.А., Ахметов А.А., Шарипов В.Н. и др. Причина пескопроявлений при добыче газа и методы их ликвидации, применяемые на Уренгойском месторождении // Проблемы освоения месторождений Уренгойского комплекса: сб. науч. тр. М.: Недра, 1998. С. 323–329.

6. Захаров А.А., Шашков Г.Я. Прогнозная оценка состояния призабойных зон пластов со слабосцементированными коллекторами газовых и газоконденсатных месторождений // Проблемы капитального ремонта скважин и эксплуатации ПХГ: сб. науч. тр. СевКавНИПИгаз. Ставрополь: РИЦ ООО «СевКавНИПИгаз», 2003. Вып. 39. С. 82–86.

7. Мартос В.Н. Методы борьбы с выносом песка // Обзор зарубежной литературы: серия Добыча. М.: ВНИИОУЭНГ, 1973.

8. Алиев З.С., Андреев С.А., Власенко А.П. и др. Технологический режим работы газовых скважин. М.: Недра, 1978.

9. Karev V.I. Geomechanical Approach to Improving the Efficiency of the Operation of Underground Gas Storages / (eds) Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Ser. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Switzerland: Springer International Publishing, 2018. P. 150-158.

10. Biot M.A. Le problème de la consolidation des matières argileuses sous une charge // Ann. Soc. Sc. de Brux. 1935. Ser. B. V. 55. P. 110–113.

11. Biot M.A. General theory of three—dimensional consolidation // Journal of Applied Physics. 1941. V. 12. P. 155–165.

12. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Известия Академии наук СССР. Отд. техн. наук. 1955. № 5. С. 3–41.

13. Терцаги К. Теория механики грунтов. М.: Госстройиздат, 1961.

14. Ляв А. Математическая теория упругости. – М. – Л.: ОНТИ НКГиП СССР. – 1935. –676 с.

15. Тимошенко С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер // М.: Наука. 1979. 560 с.

РАСТЕКАНИЕ ПЯТЕН НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЛЬДА А.В. Кистович

Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия kavmendeleevo@mail.ru

Механизм растекания нефти по поверхности льда требует учёта следующих основных факторов:

 Переход потенциальной энергии системы нефть-лёд-воздух в кинетическую энергию в гравитационном поле из-за изменения геометрических характеристик разлива с течением времени.

– Изменение количества поверхностной энергии системы "нефть на льду" по причине изменения площадей контактных границ "нефть - воздух", "нефть – лёд", "воздух - лёд".

– Торможение растекания нефти за счёт шероховатости поверхности льда и за счёт увлечения водной массы (в случае разлива подо льдом).

– Образование застойных зон в местах заполнения шероховатостей нефтью, что приводит к уменьшению массы нефти, участвующей в процессе растекания.

Как было показано в [1], в приближённой модели допустимо пренебречь вязкими тепловыми потерями в нефти и воздухе, но теперь необходимо учесть влияние шероховатой поверхности на динамику процесса. Модель шероховатого льда и процесса растекания по нему нефти основывается на ряде статистических характеристик, позволяющих описывать изучаемое явление в среднем. Лабораторные эксперименты и наблюдения за разливами нефти по льду в природе показывают, что нефтяной разлив в большинстве случаев представляет собой пятно неправильной формы. Аналитическое описание динамики пятен неправильной формы, постоянно изменяющейся во времени, представляет собой неразрешимую задачу. По этой причине в дальнейшем изучается растекание пятен, которые в среднем являются осесимметричными. Модель осесимметричного растекания нефтяного пятна в среднем представляет собой цилиндрическую область с изменяющимся во времени радиусом ее границы R(t), верхняя горизонтальная граница которой (поверхность контакта масла с воздухом) описывается координатой z = h(t), а нижняя часть (поверхность контакта масла со льдом) описывается координатой $z = \zeta(r, \varphi)$. Учет шероховатости поверхности льда требует создания их статистической модели, которая основана на предположении, что среднее значение отклонений поверхности льда $\zeta(r, \varphi)$ от горизонтали равно нулю: $\overline{\zeta(r,\varphi)} = 0$, среднеквадратичное отклонение определяется некоторой постоянной величиной

 $\delta_{\zeta} = \sqrt{\langle (\zeta(r,\varphi) - \overline{\zeta(r,\varphi)})^2 \rangle} = h_*$, которая определяет характерный размер шероховатости. На основе предложенной модели нефтяного пятна и приведенных выше соотношениях, постоянный объем нефти V определяется выражением $V \approx \pi R^2 h$. Для реализации энергетического подхода, описанного в [1], необходимо рассчитать потенциальную, кинетическую и поверхностную энергии рассматриваемой системы. Потенциальная энергия определяется соотношением

$$\Pi = 2\pi\rho_0 g \int_0^R \int_{h_*}^h rz dr dz = \frac{\pi R^2}{2} \rho_0 g (h^2 - h_*^2).$$

Кинетическая энергия, рассчитанная по аналогии с [1] на основе приблизительного распределения поля скоростей в нефти ($V_r = r\dot{R}/R$, $V_z = -2(z - h_*)\dot{R}/R$) задаётся выражением

$$T_0 = \pi \rho_0 \int_0^R \int_{h_*}^h (v_r^2 + v_z^2) r dr dz = \frac{\pi \rho_0}{4} \dot{R}^2 (h - h_*) (R^2 + \frac{8}{3} (h^2 - h_*^2)).$$

Поверхностная энергия системы описывается формулой

 $E_{S} = \pi R^{2} (k\sigma_{oi} + \sigma_{oa} - k\sigma_{ai}) = \pi R^{2} \sigma, \sigma = k\sigma_{oi} + \sigma_{oa} - k\sigma_{ai},$ где σ_{ij} – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела -той и *j*-той сред (" σ " – нефть, "i" – лёд, "a" – воздух), k – средний коэффициент увеличения площади шероховатой поверхности льда по сравнению с гладкой поверхностью.

Количество энергии, теряемой нефтью из-за торможения на неровностях, описывается выражением

$$T_r = \int_{t_0}^t C_r \frac{h_*}{h} \dot{R}^2 dt = \int_{t_0}^t C_r \,\varepsilon(t) \dot{R}^2 dt, \,\varepsilon(t) = \frac{h_*}{h} = \frac{\pi R^2 h_*}{V} = \frac{R^2}{R_*^{2\prime}}$$

где C_r – некоторый коэффициент энергетических потерь, определяемый для льда только экспериментально, $R_* = \sqrt{V/\pi h_*}$ – средний по ансамблю реализаций предельный радиус пятна (при фиксированном объёме V), is the average of the ensemble of realizations of the limiting radius of the spot (with a fixed volume V), когда вся нефть распределена во впадинах шероховатостей.

Как было показано в [1], приближенное уравнение энергетической динамики системы при разливе нефти по льду записывается в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\mathbf{T}_0 + \mathbf{\Pi} + E_S + \mathbf{T}_r) = 0,$$

подстановка в которое вышеприведённых соотношений с учётом малости величины $V/\pi R^3$ [] 1, придаёт ему окончательный вид

$$2\varepsilon\ddot{\varepsilon}(1-\varepsilon) - \dot{\varepsilon}^2 - a(1+\varepsilon^2) + b\varepsilon^2 + c\varepsilon^2\dot{\varepsilon} = 0, \qquad (1)$$

где $a = 8\pi V g / S_*^2$, $b = 16\pi\sigma / M_o$, $c = 4C_r / M_o$, M_o – постоянная масса нефти, $S_* = \pi R_*^2 = V/h_*$ – средняя по ансамблю предельная площадь, которую может занять нефть, растекающаяся по шероховатому льду.

Решение уравнения (1) проводится для трёх временных отрезков, соответствующих началу растекания, середине процесса и, наконец, завершению растекания.

Начало растекания. На этой стадии имеются малые величины Е□ 1 (площадь пятна на этом этапе существенно меньше его предельной площади) и $\dot{\epsilon} = 2\epsilon \dot{R}/R \Box \dot{R}/R$. В этом случае сила сопротивления и относительное уменьшение массы растекающейся нефти из-за заполнения углублений шероховатости льда все еще невелики. Кроме того, влияние сил поверхностного натяжения невелико по сравнению с силой инерции, так что (1) сводится к виду

$$2\varepsilon\ddot{\varepsilon} - a = 0 \,. \tag{2}$$

Решение (2) представляется в неявном виде относительно переменной ^ε:

$$\sqrt{\frac{\pi}{a}}\varepsilon_{b}e^{-\dot{\varepsilon}_{b}^{2}/a}\left(\operatorname{erfi}\left(\sqrt{\ln(\varepsilon/\varepsilon_{b})+\dot{\varepsilon}_{b}^{2}/a}\right)-\operatorname{erfi}\left(\dot{\varepsilon}_{b}/\sqrt{a}\right)\right)=t-t_{b},$$
(3)

где t_b – время начала этапа, $\varepsilon_b = \varepsilon \Big|_{t=t_b}$, $\dot{\varepsilon}_b = \dot{\varepsilon} \Big|_{t=t_b}$, и $\operatorname{erfi}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_{0}^{z} e^{x^2} dx$.

Середина процесса. В этом случае $\epsilon = 1/2 + \mu$, $\mu \Box 1$. На этом этапе все члены уравнения влияют на процесс растекания и (2.7) преобразуется в уравнение

$$2\ddot{\mu} - 4\dot{\mu}^2 + c\dot{\mu} + b - 5a = 0, \tag{4}$$

решение которого имеет вид

$$\mu = \mu_m + \frac{c - d}{8}(t - t_m) + \frac{\ln 2}{2} - \frac{1}{2}\ln\left(1 + \frac{c - 8\dot{\mu}_m}{d} + \left(1 - \frac{c - 8\dot{\mu}_m}{d}\right)e^{-\frac{d(t - t_m)}{2}}\right),\tag{5}$$

где $d = \sqrt{c^2 - 16(5a - b)}, \quad \mu_m = \mu|_{t=t_m}, \quad \dot{\mu}_m = \dot{\mu}|_{t=t_m}, \quad t_m$ – время начала средней стадии. Завершение растекания. При этом $\varepsilon = 1 - \delta$, $0 \le \delta \square$ 1 и уравнение (1) приобретает вид $2\delta\ddot{\delta} + c\,\dot{\delta} + 2a - b = 0$. (6)

Решение этого уравнения представляется в форме квадратуры

$$\int_{\delta(t)}^{c_e} \frac{dx}{1 + W\left(-\beta e^{-\beta} \left(x/\delta_e\right)^{\alpha}\right)} = \frac{2a-b}{c}(t-t_e)$$
$$\alpha = \frac{c^2}{2(2a-b)}, \quad \beta = 1 + \frac{c}{2a-b}\dot{\delta}_e, \quad \delta_e = \delta\big|_{t=t_e}, \quad \dot{\delta}_e = \dot{\delta}\big|_{t=t_e}$$

где W(x) – функция Ламберта, которая является решением функционального уравнения $W(x)e^{W(x)} = x$, t_e – время начала конечной стадии процесса растекания.

Графики роста площади нефтяного пятна на разных стадиях процесса показаны на рисунки 1-3.



Рисунок 1. Графики зависимости площади пятна на начальной стадии растекания, рассчитанные в соответствии с (3) для одного значения начальной площади и различных значений темпов роста начальной площади є_b.



Рисунок 2. Зависимости площади пятна на средней стадии растекания, рассчитанные в соответствии с (5) для единого значения площади µ_m и различных скоростей µ_m.



Рисунок 3. Зависимости площади пятна на заключительном этапе, рассчитанные в соответствии с (6) с учетом соотношения ε = 1 – δ.

На начальном этапе, рисунок 1, поведение решения существенно зависит от начальных условий. Так, если в начальный момент края пятна неподвижны ($\dot{\varepsilon}_b = 0$), затем в первые моменты распространения площадь пятна увеличивается пропорционально квадрату временного интервала, отсчитываемого с момента t_b начала движения. В случае ненулевой начальной скорости ($\dot{\varepsilon}_b \neq 0$) закон увеличения площади пятна начинает отличаться от квадратичного, и чем больше начальная скорость $\dot{\varepsilon}_b$, тем ближе закон роста к линейному.

На больших временах $t - t_m \square 2/d$, рисунок 2, скорость роста площади пятна на средней стадии процесса не зависит от начальных условий μ_m и μ_m , но определяется только объемом

разлитого нефтепродукта, коэффициентами поверхностного натяжения на границе раздела сред и коэффициентом сопротивления движению из-за шероховатости льда.

Достижение наибольшего возможного значения $\varepsilon = 1$, рисунок 3, связано с исчерпанием запасов разлитой нефти, расположенных за пределами заполненных неровностей.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки, соглашение 075-15-2020-802.

Литература/References:

1. Чаплина Т.О., Кистович А.В., Пахненко В.П. Радиальное растекание нефтепродуктов по поверхности воды //Прикладная математика и механика, 2022, Т. 86, № 6, С. 956 – 974. https://doi.org / 10.31857/S0032823522060078.

МЕХАНИЗМЫ ПРОЯВЛЕНИЯ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ В МИКРОВОЛНОВОМ И ОПТИЧЕСКОМ ДИАПАЗОНАХ А.В. Медведева¹, С.В. Станичный¹, В.В. Булатов²

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Морской гидрофизический институт РАН», Севастополь, Россия ²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики

чесерильное госубирственное опожетное учреждение науки институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

<u>suomi-npp@mail.ru</u>

Движения в поверхностном слое океана, вызываемые прохождением внутренней волны, вызывают возмущения в характеристиках границы раздела океан-атмосфера и стратификации верхнего слоя. Внутренняя волна формирует чередующиеся конвергентные и дивергентные зоны, параллельные фронту волны, и, собственно, изменяет глубину верхнего слоя. Именно эти два фактора влияют на параметры среды, формирующие сигналы датчиков дистанционного зондирования оптических сканеров и радиолокаторов. Ниже приведен обзор особенностей проявления внутренних волн на спутниковых оптических изображениях высокого пространственного разрешения (MSI Sentinel-2, OLI Landsat-8) и на радиолокационных снимках (C-SAR Sentinel-1).

1. Радиолокационные изображения

На радиолокационных изображениях поверхностное проявление внутренних волн определяется изменением шероховатости морской поверхности в конвергентно-дивергентных зонах. Выделяются два механизма модуляции – гидродинамический и сликовый [1]. Гидродинамическая модуляция поверхности при прохождении пакета внутренних волн вызывает увеличение шероховатости морской поверхности в зонах конвергенции и соответственно увеличение рассеянного излучения. Обычно случаи гидродинамического проявления внутренних волн обнаруживаются на фоне низких или умеренных скоростей ветра (примерно от 2-3 до 7-8 м/с).

Сликовый механизм также связан с формированием внутренними волнами системы конвергентно-дивергентных течений и модуляции пленок (сликов) природного или антропогенного происхождения. При прохождении пакета внутренних волн наблюдается противоположные гидродинамическому механизму эффекты: слики, концентрируясь в зонах конвергенции, выглаживают поверхность и способствуют ослаблению обратного рассеяния. Случаи проявления сликового механизма регистрируются обычно на фоне ветров со скоростями до 2-3 м/с.

2.Оптические изображения

На оптических спутниковых изображениях механизмы проявления внутренних волн определяются не только изменением шероховатости морской поверхности и отраженного солнечного излучения, но также возможным изменением восходящего из водной толщи излучения, формируемого в верхнем слое, толщина которого изменяется при прохождении внутренней волны.
модуляция поверхности. Наиболее распространенные Гидродинамическая случаи поверхностного проявления внутренних волн, регистрация осуществляется за счет отраженного излучения и аналогична регистрации радиолокационными сенсорами. Конвергентные (с большей шероховатостью) зоны в оптическом диапазоне в зависимости от взаимной геометрии Солнца и датчика могут быть как более темными, так и более светлыми. В зоне близкой к прямому зеркальному солнечному излучению увеличение шероховатости может вызывать уменьшение принимаемого датчиком сигнала, а на периферии солнечного блика, наоборот, увеличение. В промежуточной зоне может наблюдаться инверсия оптического контраста (рисунок 1), - то есть, из-за геометрических характеристик пакета для зон конвергенции и дивергенции значения яркости восходящего излучения, что в одной части фронта, могут быть противоположными в другой части, а в зоне перехода сравниваться.



Рисунок 1. Пример инверсии оптического контраста при прохождении пакета внутренних волн из Гибралтарского пролива в Средиземное море; объединенные сцены MSI Sentinel-2 от 21 июня 2017 г Сликовая модуляция поверхности.

Проявление базируется на том же принципе, что и при фиксации радиолокационными сенсорами, пленками могут являться нефтепродукты, масла, пленки биологического происхождения и иные ПАВы. Взаимодействие внутренних волн и пленок регистрируется достаточно редко, на возможность обнаружения влияют характеристики приводного ветра (проявление при ветрах со скоростями примерно до 2-3 м/с) и взаимное расположение Солнца и спутника (проявление при различии в интенсивности сигналов отраженного излучения, поступающих от пленок и окружающих вод в оптический сенсор). Прохождение пакета внутренних волн создает два варианта взаимодействия с пленочными структурами. Первый вариант заключается в том, что пленки концентрируются в зонах конвергенции и отсутствуют в зонах дивергенции – характерно для оптически «тонких» пленок (изменяющих только шероховатость поверхности). Второй вариант связан с оптически «толстыми» пленками – теми, что помимо шероховатости поверхности изменяют и коэффициент отражения поверхности: при прохождении пакета внутренних волн пленки выявляются в зонах конвергенции и дивергенции, но под действием орбитальных течений варьирует их оптическая толщина.

Модуляция глубины рассеивающего слоя. Комбинирование оптических каналов позволяет минимизировать или устранить полностью отраженное излучение и выделить восходящую из-под воды рассеянную компоненту сигнала. В рассеянном излучении обнаруживаются внутренние волны, изменяющие толщину мутного слоя: она меньше над гребнями пакета внутренних волн (достигающими или не достигающими поверхности) и больше – над подошвами. Внутренние волны с таким типом проявления обнаруживаются в районах с высоким содержанием гидрозолей (взвешенное вещество, фитопланктон) – преимущественно в зонах речных плюмов или в прибрежных зонах.

Модуляция объектов в поверхностном слое и на поверхности. Аналогично сликовому механизму концентрации пленок в конвергентных зонах, могут скапливаться и другие плавающие

субстанции. Такими объектами могут быть: различный мусор, пыльца растений, икра рыб, слоевища Саргассовых водорослей, цианобактерии, морская слизь и др. Для этих формирований характерна концентрация в зонах конвергенции при прохождении пакета внутренних волн, и на оптических изображениях выделяются квазипаралелльные полосы с повышенной яркостью восходящего излучения с максимумом излучения на различных участках видимого диапазона (что зависит от оптических свойств объектов).

Модуляция плавающих тающих, раздробленных льдов. Льды также относятся к плавающим объектам, и их изменение при прохождении внутренних волн имеет сходство с влиянием на иные плавающие объекты. Но проявление пакета внутренних волн на оптических и радиолокационных изображениях зависит от характеристик льда. Так, немногочисленные разрозненные льдины концентрируются в зонах конвергенции в зависимости от размера: большему влиянию орбитальных течений подвержены льдины малых размеров (до десятков метров), меньшему – более крупные (от сотен метров). В тех случаях, когда регистрируются начальные виды льда или тающий однолетний лед, проявление внутренних волн зависит от толщины льда: они могут представлять собой чередование зон преимущественно льда (зоны конвергенции) и преимущественно водной поверхности (зоны дивергенции) при прохождении через поле льда с малой толщиной, и могут выделяться за счет чередования льдов большей и меньшей концентрации. Во втором случае в зонах конвергенции отражение сигнала происходит ото льда, а в зонах дивергенции – от смеси льда и воды. Кроме того, регистрируются случаи, когда прохождение пакета внутренних волн меняет характеристики льда – трансформирует его в менее плотный по ширине фронта.

Модуляция обрушений поверхностных волн. Здесь работает гидродинамический механизм, вызывающий увеличение обрушений и площади покрытой пеной в зонах конвергенции. Как правило, такого рода явления наблюдаются при ветрах умеренных или высоких скоростей (от 5-8 м/с и выше) [2]. Обычно такой механизм реализуется для интенсивных внутренних волн – примером таких могут служить внутренние волны, распространяемые из Гибралтарского пролива в Средиземное море. Они генерируются под действием полусуточных приливов из-за сложного рельефа дна на входе в Гибралтарский пролив.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ №23-21-00194 «Аналитические методы математического моделирования волновой динамики неоднородных гидрофизических сред».

Литература/References:

1. Robinson I. S., 2004 Measuring the oceans from space: the principles and methods of satellite oceanography. Springer Science & Business Media.

2. Kubryakov A. A., Kudryavtsev V. N., Stanichny S. V., 2021. Application of Landsat imagery for the investigation of wave breaking. Remote Sensing of Environment. V. 253. pp. 112-144.

ОЦЕНКА ТРАНСПОРТНЫХ СВОЙСТВ ТРЕЩИНОВАТО-ПОРИСТЫХ ГЕОМАТЕРИАЛОВ ПО ДАННЫМ ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Л.А. Назарова¹, Л.А. Назаров², Н.А. Голиков², А.А. Скулкин²

¹Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, Новосибирск, Россия ²Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия larisa.a.nazarova@mail.ru

1.Введение.

Подсчет геологических и извлекаемых запасов углеводородов, инверсия ГИС данных для диагностики продуктивных интервалов и оценки добывных возможностей скважин, обоснование систем разработки нефтегазовых залежей – вот далеко не полный перечень проблем, для решения которых необходима информация о фильтрационно-емкостных свойствах пород (ФЕС) [1].

Коллекторы многих нефтяных и газовых месторождений имеют квазирегулярную трещиноватопористую структуру (Рис. 1а, б). Для анализа процессов массообмена в таких объектах применяют DP модели [2], когда в матрице и трещинах одновременно сосуществуют гидродинамические поля, подчиняющиеся идентичными уравнениям, но с различными пористостью и проницаемостью. Их оценка в лабораторных и натурных условиях – непростая задача, в частности, из-за контрастности механических свойств матрицы и трещин, а также резкого изменения некоторых из них при вариации поля напряжений. Здесь предложен метод оценки трещинной проницаемости по данным деформационных и фильтрационных испытаний искусственных слоистых образцов.



Рисунок 1. Фрагменты кернов пород-коллекторов Качкарского (а) и Северо-Кальчинского (б) нефтяных месторождений; слоистый образец из искусственного геоматериала (в)

2. Деформационные эксперименты.

Образцы (Рисунок 1в) компоновались из шести пластин-блоков (длина $x_0 = 100$ мм, ширина $y_0 = 70$ мм, толщина h = 10 мм), изготовленных из смеси песка и криогеля по оригинальной технологии [3]. Модуль Юнга Y = 370 МПа и проницаемость $k_1 = 8.4$ Д искусственного геоматериала (матрицы) определены по стандартным методикам.

Цель деформационных испытаний – найти зависимость от нормального напряжения S раскрытий трещин (межблочных нарушений сплошности) d (Рис. 1в), контролирующих их проницаемость k_2 и расход при фильтрационных процессах. Для этого к образцу 1 (Рисунок 2а) прикладывалась ступенчато возрастающая сжимающая нагрузка, величина F которой фиксировалось динамометром 2 (Таблица 1, графа 2). Часовым индикатором 3 на каждом шаге нагружения $m = 1 \dots 10$ измерялось укорочение образца ΔH (Табл. 1, графа 4), складывающееся из изменений толщины пластин Δh и сближений w берегов нарушений. Тогда

$$w = (\Delta H \cdot n \Delta h) / (n \cdot 1), (1)$$

где $\Delta h = hs/Y$, $s = F/(x_0y_0)$ – нормальное напряжение (Таблица 1, графа 3), n = 6 – число пластин.

Для аппроксимации полученных данных (Табл. 1, графы 3 и 5) использовалась функция

$$s(w) = s * w/(w * -w), (2$$

предложенная в [4]. Методом наименьших квадратов определены значения s = 122 кПа и предельного сближения w = 73.3 мкм. В графе 6 (Таблица 1) приведены рассчитанные по (2) теоретические величины сближений берегов, а в графе 7 – раскрытия нарушений d = w * -w.



Рисунок 2. Установки для деформационных (а) и фильтрационных (б) испытаний образцов (стрелками показано направление сжатия)

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|---|------|----------------|------------------|----------------|-----------|----------------|
| т | F, H | <i>s</i> , кПа | ΔH , мкм | <i>w</i> , мкм | w(s), MKM | <i>d</i> , мкм |
| 1 | 200 | 29 | 75 | 14.1 | 14.2 | 59.2 |
| 3 | 400 | 57 | 135 | 25.2 | 23.8 | 48.1 |
| 5 | 800 | 114 | 200 | 36.3 | 35.9 | 37.0 |
| 8 | 1650 | 236 | 280 | 48.4 | 48.7 | 25.6 |

Таблица 1. Данные деформационных испытаний (фрагмент) и их интерпретация.

2. Фильтрационные эксперименты.

Тест А. Боковая поверхность образца, образующая которой параллельна оси *х* (Рис. 1в), изолировалась полиуретановой манжетой. Образец помещался в герметичную камеру 1 (Рис. 26). Через отверстие в корпусе осуществлялось ступенчатое сжатие, контролируемое динамометром 2. На каждом шаге нагружения $m = 1 \dots 10$ проводились фильтрационные испытания: на торце x = x_0 создавалось давление воздуха $P_i = 1.02, 1.03, ..., 1.10$ атм, а на торце x=0 при атмосферном давлении P_0 в стационарном режиме измерялся расход A(m, i) (на Рисунок 26 цифрами 3 и 4 показаны магистрали компрессора и расходомера). Тест В проводился по аналогичной программе, но на торце x = 0 нарушения сплошности герметизировались пенетрантом, регистрировался стационарный расход B(m, i). В Табл. 2 приведены экспериментальные данные для s = 57 и 236 кПа (графы 3 и 4).

Таблииа 2.

| | Данн | ые фильтрационн | ых испытаний (ф | рагмент) и р | результаты | интерпрет |
|---|-------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------|------------|--------------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| i | P_i , атм | <i>A</i> (3, <i>i</i>), л/мин | <i>B</i> (3, <i>i</i>), л/мин | k2, Д | γ | 10 ¹² α |
| 1 | 1.02 | 4.10 | 3.88 | 40.57 | 0.348 | 8.234 |
| 3 | 1.04 | 8.21 | 7.76 | 42.63 | 0.353 | 8.468 |
| 5 | 1.06 | 12.29 | 11.66 | 39.20 | 0.338 | 7.747 |
| 7 | 1.08 | 16.37 | 15.54 | 37.48 | 0.338 | 7.758 |
| 9 | 1.10 | 20.41 | 19.41 | 32.32 | 0.328 | 7.291 |
| | | | | | | |
| i | P_i , атм | <i>А</i> (8, <i>i</i>), л/мин | <i>B</i> (8, <i>i</i>), л/мин | k2, Д | γ | 10 ¹² α |
| 1 | 1.02 | 4.02 | 3.87 | 7.17 | 0.507 | 8.248 |
| 3 | 1.04 | 8.04 | 7.75 | 2.90 | 0.494 | 7.813 |
| 5 | 1.06 | 12.05 | 11.62 | 1.48 | 0.499 | 7.964 |
| 7 | 1.08 | 16.08 | 15.49 | 2.90 | 0.501 | 8.035 |
| 9 | 1.10 | 20.12 | 19.37 | 7.16 | 0.507 | 8.097 |

3.Интерпретация данных.

Стационарная фильтрация в рамках DP модели описывается четырьмя уравнениями [5]

$$k_{l}\Delta p_{l} + (-1)^{l}\alpha(p_{2} - p_{1}) = 0$$
, $V_{l} = -k_{l}\nabla p_{l}/\eta$, (3)

где p_l – давление, $V_l = (U_l, V_l, W_l)$ – скорость, η – вязкость газа, α – безразмерный коэффициент массообмена, индексы l=l,2 характеризуют величины, соответствующие матрице и трещинам. Сформулируем граничные условия, отвечающие условиям эксперимента: $V_l(x, 0, z) = V_l(x, y_0, z) = W_l(x, y, 0) = W_l(x, y, z_0) = 0, \quad p_l(x_0, y, z) = P_i;$ (4)

Lect A
$$p_l(0, y, z) = P_0$$
; Lect B $p_1(0, y, z) = P_0, U_2(0, y, z) = 0.$ (5)

Для системы (3)-(5) найдено аналитическое решение, в частности, для условий «*Tecm A*» $p_l(x, y, z) = P_0 + (P_i - P_0)x/x_0$. $P_0)x/x_0$,

$$p_l(x, y, z) - r_0 + (r_i - r_0)$$
 по которому получены выражения для расходов:

Tecm A
$$Q_A = (k_1 S_1 + k_2 S_2)G;$$

Тест В Q_B = $k_1 S_1 G \gamma (k_1 + k_2) \cos \gamma / (k_1 \gamma \cos \gamma + k_2 \sin \gamma)$, где ведены обозначения $S_1 = nhy_0$, $S_2 = (n-1)dy_0$, $\gamma = x_0 \sqrt{\alpha(1/k_1 + 1/k_2)}$, $G = (P_i - P_0)/\eta x_0$. Решая для каждого *i* и *m* при известных k_1 , *d* и $\eta = 0.000018$ Па·с (воздух) уравнение $A(m,i) = Q_A$, найдем (Таблица 2, графа 5)

 $k_2(m,i) = (A(m,i)/G - k_1S_1)/S_2$, причем из-за разброса значений k_2 в качестве величины трещинной проницаемости принималось среднее по i=1...9, поэтому $k_2=39.6 \ Д$ при m=3 и $k_2=5.26 \ Д$ при m=8.

Для определения коэффициента массообмена α при известном k_2 решалось уравнение $B(m,i)=Q_B(6)$

относительно у (Таблицы 2, графа 6), тогда

$$a = \frac{k_1 k_2 \gamma^2}{(k_1 + k_2) x_0^2}$$

(Таблица 2, графа 7). Следует отметить, что при $\gamma <<1$ уравнение (6) имеет приближенное аналитическое решение

 $\gamma^2 \approx (2-T)/(\tilde{1}-\beta T).$

где $T = \hat{Q}_B / (k_1 S_1 G), \beta = (k_1 + k_2/3) / (k_1 + k_2).$

Проведенный анализ показал, что с ростом напряжений коэффициент массообмена практически не меняется, а трещинная проницаемость, как и ожидалось, быстро убывает.

4.Заключение.

Предложенный подход позволяет в лабораторных условиях провести количественную оценку коэффициентов DP моделей, описывающих процессы массопереноса в средах квазирегулярной трещиновато-пористой структуры.

Дальнейшие исследования будут направлены на разработку методов определения фильтрационно-емкостных свойств трещиновато-пористых пород стохастической структуры, а также учета сжимаемости матрицы при интерпретации данных лабораторных испытаний.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-27-00339.

Литература/References:

1. Robinson P. & Hsu C., 2017. Introduction to Petroleum Technology. Springer, Cham. P. 1-83.

2. Barenblatt G.I., Zheltov Yu.P. & Kochina I.N., 1960. On the basic representations of the theory of filtrations of homogeneous fluids in fissured rocks. Prikl. Mat. Mekh. 24(5): 852–864.

3. Nazarova L.A., Nazarov L.A., Golikov N.A. & Skulkin A.A. 2019. Stress-permeability dependence in geomaterials from laboratory testing of cylindrical specimens with central hole. J. Min. Sci. 55(5): 708–714.

4. Bandis S.C., Lumsden A.C. & Barton N.R., 1983. Fundamentals of rock joint deformation. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abs. 20(6): 249-268.

5. Nazarova L.A. & Nazarov L.A., 2023. An approach to determination of stress-dependent properties of fractured porous rocks by lab test data. Processes in GeoMedia VI. Springer, Berlin. P. 267-276.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ АВИАЦИОННОГО ЛАЗЕРНОГО ЛОКАТОРА ЗЕРКАЛЬНЫХ БЛИКОВ ОТ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ВЕЕРНОЙ ДИАГРАММОЙ НАПРАВЛЕННОСТИ ЗОНДИРУЮЩЕГО ЛУЧА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В.Н. Носов¹, С.Г. Иванов¹, С.Б. Каледин², В.Д. Володин¹, В.И. Тимонин², Т.В. Глебова¹

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, РФ ²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ <u>ivanovsg5167@yandex.ru</u>

Для исследования гидродинамических процессов (ГДП), происходящих в морской среде (вихри, течения, внутренние волны, обтекание неровностей дна и подводных конструкций типа газопроводов), можно использовать дистанционные измерения характеристик морской поверхности. Для этого могут применяться радиолокационные и лазерно-оптические методы, позволяющие выполнять измерения дистанционным образом, как с борта судна, так и с авиа и космического носителя. В работах [1,2] выполнена регистрация ГДП в виде следа судна с борта самолета и Международной космической станции, соответственно, с использованием мультиспектральной съемки и цифровой фотографии. Одним из эффективных методов для дистанционного исследования характеристик волнения является использование лазерных локаторов морского волнения [3]. С их помощью выполняют последовательное сканирование узким лазерным лучом морской поверхности с последующим приемом излучения, отраженного назад от участков волн, перпендикулярных к падающему лучу. Такой подход позволяет выполнять измерения с борта судна при относительно небольшой мощности лазерного излучения. Одним из возможных перспективных вариантов является малогабаритный сканирующий лазерный локатор (МСЛЛ) с веерной диаграммой лазерного пучка, разработанный в ГЕОХИ РАН и апробированный в морских условиях [4]. В МСЛЛ морская поверхность освещается лазерным лучом с веерной диаграммой направленности. Такая диаграмма представляет собой плоский «лист» с угловой шириной 0.5 мрад (в направлении по ходу движения судна) и углом раствора около 20° (в поперечном направлении). С помощью приемного объектива лазерная полоса проецируется на линейный многоэлементный фотоприемник. Скорость сканирования (частота измерения) может составлять 50-500 считываний в секунду в зависимости от характеристик многоэлементного фотоприемника, быстродействия АЦП и бортового процессора, а также ширины полосы информационного канала. Получаемые при таком способе сканирования данные, идентичны получаемым с помощью лазерного локатора с последовательным оптико-механическим сканированием [3,5]. При этом расстояние в изображении между отражениями (лазерными бликами), выраженное в пикселах фотоприемника, соответствует геометрическому расстоянию между элементами волнения и временному интервалу между отражениями при последовательном сканировании. Как показали натурные морские измерения, такое схемотехническое решение для судового МСЛЛ оказалось весьма эффективным. Для расширения возможностей дистанционного сканирования морской поверхности при исследовании ГДП со «временем жизни» до нескольких часов и с масштабом от сотни метров до нескольких десятков километров возникает необходимость использовать подобный подход при размещении аппаратуры на авиационном носителе, в частности на беспилотном летательном аппарате (БЛА). В докладе рассматриваются особенности решения этого вопроса.

При проведении оценок были приняты следующие условия: скорость полета – 30 м/с, высота полета 100 м, ширина захвата поперек движения до 30 м. Большая дистанция требует увеличения мощности лазерного излучателя по сравнению с судовым вариантом. Для оценок в качестве задающего лазера использованы характеристики твердотельных лазеров с диодной накачкой со 2-й гармоникой. Режим его работы - импульсный (длительность импульса излучения около 7-10 нс), длина волны генерации λ =527 нм, спектральная ширина излучения лазера не более 3 нм. Фокусирующая оптика обеспечивает расходимость излучения лазера 0.5 мрад х 20° в направлении вдоль и поперек полета авианосителя, соответственно. Для оценок в качестве приемного объектива использованы характеристики проекционного объектива ОП-55АР диаметром 49 мм и фокусным расстоянием 100 мм.

Рассмотрен прием отраженного от МП лазерного излучения (блика) с помощью ПЗС-линейки Sony ILX554A, у которой 2048 пикселей, имеющих размер 14х56 мкм и расположенных на площадке длиной 30 мм. Для обработки сигналов используются сдвоенные пиксели (размер площадки 28х56 мкм). Приемная система обеспечивает обзор морской поверхности: 5 см вдоль и 30 м поперек направления полета носителя. Телесный угол мгновенного углового поля составляет 1,6 · 10⁻⁷ ср, что обеспечивает необходимое пространственное разрешение МСЛЛ.

Важнейшим вопросом является обеспечение энергетической чувствительности прибора при регистрации отраженных лазерных бликов от морской поверхности. Мощность сигналов от лазерных бликов определяется как мощностью лазерного излучателя и параметрами приемного объектива, так и эквивалентной кривизной морской поверхности в области зеркального отражения [5]. Для их надежной регистрации необходимо обеспечить требуемое отношение сигнала к шуму. Шумовые помехи сильно зависят от фонового излучения яркости моря. При оценках было принято экспериментально измеренное значение спектральной яркости моря в спектральной области 527 нм, что с учетом излучения неба, отраженного от моря, составило 1.3 · 10⁻² BT/(м² нм ср). С учетом этой величины мощность фонового излучения составила 9 · 10⁻¹² BT.

При оценке соотношения сигнал/шум по параметрам электрических сигналов и дробовых шумов учтена особенность формирования сигналов в ПЗС- приемнике. Зарядовый пакет формируется в соответствии с экспозицией чувствительного элемента приемника. Таким образом, сигналы с ПЗС-линейки пропорциональны энергии падающего излучения, если длительность импульса меньше времени экспозиции ПЗС-линейки. Поскольку фоновое излучение воздействует постоянно, а лазерное излучение только в течение короткого времени импульса лазера (около 10 нс), то фоновый, помеховый сигнал существенно возрастает, что ухудшает соотношение

сигнал/шум. По этой причине для увеличения отношения сигнал/фон необходимо устанавливать минимально возможное для ПЗС-линейки время накопления сигнала – 10 мкс. При такой экспозиции энергия фонового излучения, идущего из моря и отраженного морем излучения неба, оценивается величиной $9 \cdot 10^{-17}$ Дж. Для мелкомасштабного морского волнения с эквивалентным радиусом кривизны 25 мм при энергии лазерного импульса 2.2 мДж и высоте полета 100 м величина энергии лазерного блика оценивается значением $2.7 \cdot 10^{-1}$ Дж, что в 3 раза превышает фоновый сигнал. Поскольку излучение лазера линейно поляризовано, то фоновая засветка может быть уменьшена примерно в 2 раза при установке поляризатора на входном объективе прибора. Это позволяет использовать лазер с энергией в импульсе около 1 мДж при том же отношении сигнал/фон. Лазеры с такими параметрами являются компактными и обладают низким энергопотреблением. Также выполнена оценка темновых шумов ПЗС-линейки, которые оказались меньше фоновых сигналов.

Полученные оценки свидетельствуют о возможности выполнения исследований морской поверхности с высоты 100 м при размещении на БЛА МСЛЛ на основе оптико-электронного сканирования с веерной диаграммой направленности лазерного пучка. Данное устройство открывает возможности по дистанционному оперативному исследованию происходящих в морской среде ГДП с масштабом от сотни метров до нескольких десятков километров.

Литература/References:

1. Wright R., Deloatch J., Osgood S., Yuan J., 2012. The spectral reflectance of ship wakes between 400 and 900 nanometers//IGARSS: 4186-4189.

2. Носов В.Н., Иванов С.Г., Тимонин В.И., Подгребенков А.Л., Плишкин А.Н., Каледин С.Б., Глебова Т.В. Ядренцев А.Н., Захаров В.К.,2015. Совместный космический и морской эксперимент по комплексной регистрации следа судна. Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 8. №4: 34-35.

3. Горелов А.М., Зевакин Е.А., Иванов С.Г., Каледин С.Б., Леонов С.О., Носов В.Н., Савин А.С., 2012. О комплексном подходе к дистанционной регистрации гидродинамических возмущений морской среды оптическими методами. Физические основы приборостроения.1. №4: 58-65.

4. Носов В.Н., Володин В.Д., Иванов С.Г., 2020. Лазерный локатор для регистрации статистических характеристик зеркальных бликов на морской поверхности с веерной диаграммой направленности зондирующего пучка. Фундаментальная и прикладная гидрофизика.13. №2: 88-95. Doi: 10.7868/52073667320020112.

5. Иванов С.Г., Каледин С.Б., Носов В.Н., Петухов А.В., Савин А.С., 2021. Перспективы применения беспилотных летательных аппаратов для лазерного зондирования морской поверхности. Физические основы приборостроения. 10. №1(39): 70-81.

ВОЗМОЖНОСТИ СУДОВОГО МАКЕТА АЭРОЗОЛЬНОГО ЛИДАРА НА ОСНОВЕ НЕПРЕРЫВНОГО ЛАЗЕРА ПО РЕГИСТРАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ВБЛИЗИ МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ

В.Н. Носов¹, С.Г. Иванов¹, С.Б. Каледин², В.И. Тимонин², Т.В. Глебова¹

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, РФ ²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ ivanovsg5167@yandex.ru

Гидродинамические явления, происходящие в толще морской среды, оказывают влияние на морскую поверхность и приповерхностные слои морской среды и атмосферы. К таким явлениям относятся внутренние волны, крупномасштабные подводные вихри и течения. Глубинные возмущения морской среды изменяют характеристики поверхностного волнения [1]. Также их влияние может приводить к изменению концентрации аэрозоля в приводном слое атмосферы [2]. Экспериментально показано, что на распределение концентрации аэрозолей в шельфовой зоне влияет и рельеф дна [3]. Натурные эксперименты [4], проведенные с морской платформы, подтвердили эффект изменения характеристик аэрозоля вблизи морской поверхности под воздействием гидродинамических возмущений морской среды в виде струи от погружного насоса.

В настоящее время для дистанционного исследования аэрозолей используются лидары на основе упругого рассеяния. Для достижения максимальной дальности зондирования при этом в качестве задающего лазера используются достаточно мощные твердотельные лазеры с короткой длительностью импульсов (5-10 нс). Экспериментально показана возможность измерения оптических неоднородностей атмосферы с помощью таких лазеров [5]. Однако, такие лидары являются достаточно дорогостоящими. Если не требуется большая дальность зондирования, то в аэрозольных лидарах можно использовать непрерывные лазеры, которые значительно дешевле. Ранее лидар на основе непрерывного лазера использовался нами при выполнении морских исследований с борта судна, когда осуществлялся поиск аномалий (неоднородностей) в распределении приповерхностного аэрозоля, вызванных воздействием гидродинамических возмущений в виде воздействия на морскую среду корпуса движущегося судна [6]. В этом случае сигнал от аэрозолей может измеряться на расстоянии нескольких метров (6-10 м) от борта судна, в невозмущенной корпусом судна зоне. Основная трудность при работе в дневных условиях обусловлена наличием фонового сигнала от неба и моря. Для подавления фонового сигнала нами использован метод синхронного детектирования, для осуществления которого лазер переводился в частотный режим с помощью управляющих импульсов от внешнего генератора. Недавно этот метод использовался в оптическом зонде обратного рассеяния для баллонных аэрологических измерений [7]. Данный прибор является достаточно компактным, но может выполнять измерения только в ночное время из-за использования светодиодов в качестве источников возбуждения аэрозольного рассеяния. Светодиоды обладают малой по сравнению с лазерами мощностью и имеют широкий спектр излучения, что затрудняет эффективное подавление солнечной засветки в дневное время.

В дневных условиях при наблюдении с борта судна в направлении на 5-10 градусов выше линии горизонта основную помеху при регистрации сигналов аэрозольного рассеяния создает излучение, идущее от неба. Приведенные в настоящей работе оценки показывают, что в дневное время фоновый сигнал от неба может на три порядка превышать сигнал от аэрозольного рассеяния. Оценки мощности аэрозольного рассеяния выполнены для импульсной мощности зондирующего лазера 700 мВт (частота следования импульсов 500 Гц). При диаметре приемного объектива d_т = 12 см, его площади $A_0 = 1.13 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$, пропускании оптики лидара $T_{oc} = 0.4$ и пропускании атмосферы на короткой трассе $T_a = 1$ получено, что мощность сигнала аэрозольного рассеяния на входном окне фотоприемника с расстояния 3.5 м при длине зоны регистрации 2 м может быть оценена величиной $P_a(3.5) = 3.1 \cdot 10^{-10}$ Вт. При оценке использовалось некоторое среднее значение коэффициента объемного обратного аэрозольного рассеяния $\beta_{\pi} = 6 \cdot 10^{-7} \text{ м}^{-1} \text{ к}$ ср⁻¹. С учетом величины спектральной яркости неба в зените L(532) = 0.1 Вт. M^2 нм⁻¹ ср⁻¹ мощность фонового сигнала от неба оценивается много большей величиной $P_{\phi} = 9 \cdot 10^{-8}$ Вт.

Для выделения сигнала аэрозольного сигнала над фоном в лидаре использовано синхронное детектирование сигнала, которое выполняется с помощью разработанной программы. Измерения, выполненные в летнее время в атмосфере вблизи лабораторного корпуса, показали, что в дневное время сигнал аэрозольного рассеяния в 1600 раз меньше фонового сигнала солнечного излучения, диффузно отраженного от листвы деревьев и попадающего в поле зрения лидара. Программа обработки сигналов лидара позволяет выделять высокочастотную (ВЧ) и низкочастотную (НЧ) части сигналов. Измерения показали, что при усреднении сигнала 1 секунда за время регистрации 30 минут обнаружены две аномалии продолжительностью около 1 минуты. Увеличение рассеяния в аномалиях достигает примерно 25% от среднего значения. Данные аномалии могут быть вызваны оптическими неоднородностями в атмосфере, связанные с возрастанием плотности аэрозоля, и которые ранее также регистрировались при использовании аэрозольного лидара на основе мощного импульсного лазера [5]. Кроме прямого наблюдения амплитуд сигналов аэрозольного рассеяния обнаружение неоднородностей в атмосференых аэрозолях может быть выполнено путем обработки сигналов лидара корреляционные матрицы для ВЧ и НЧ составляющих сигналов аэрозольного рассеяния имеют

специфические особенности во времена наблюдения аномалий в исходных сигналах. Полученные результаты позволяют более корректно интерпретировать экспериментальные данные натурных морских исследований.

Литература/References:

1. Филлипс О.М. Динамика верхнего слоя океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1980, 320 с.

2. Баханов В.В., Горячкин Ю.Н., Корчагин Н.Н., Репина И.А., 2007. Локальные проявления глубинных процессов на поверхности моря и в приводном слое атмосферы. Докл. РАН. 414. №1: 111–115.

3. Piskozub J., 1995. Study of spatial distribution of marine aerosol over sea coast with a multifrequency lidar system. Proc. SPIE. 2471: 387-389.

4. Носов В.Н., Каледин С.Б., Горелов А.М., Леонов С.О., Кузнецов В.А., Погонин В.И., Савин А.С., 2012. Особенности светорассеяния в приводном слое атмосферы над областями долгоживущих гидродинамических возмущений морской среды. Докл. РАН. 442. № 4: 549 — 550.

5. Филимонов П.А., 2021. Исследование характеристик аэрозольных неоднородностей в приземной слое атмосферы в ближнем УФ диапазоне / П.А. Филимонов, С.Е. Иванов, В.А. Городничев [и др.] Радиостроение. №1: 14-28. DOI:10.36027//rdeng.0121.0000187.

6. Носов В.Н., Каледин С.Б., Иванов С.Г., Тимонин В.И., 2019. Дистанционная регистрация следа судна по проявлениям на морской поверхности и приповерхностном слое морской среды и атмосферы. Оптика и спектроскопия. 127. Вып. 4: 616-621. DOI: 10.25210/jfop-2101-070081.

7. Балугин Н.В., Фомин Б.А., Юшков В.А., 2022. Оптический зонд обратного рассеяния для баллонных аэрологических измерений. Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 58. №3: 365-372.

ПОЯС ВЕРОННЕ: ПРОЯВЛЕНИЯ ЭНДОГЕННЫХ ПРОЦЕССОВ НА ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РАЗЛИЧНЫХ КОМПОНЕНТАХ ГЕОСИСТЕМ

А.А. Пасхина

Географический факультет, Московский государственный универсистет им. М.В.Ломоносова, Россия <u>angpaskh@gmail.com</u>

1.Введение.

В 1914 г. французский математик А. Веронне опеделил на основе явлений приполюсного сжатия эллипсиоида вращения, прецессии и изменяющейся угловой сокорости критические широты для земного сфероида — 35 параллели в северном и южном полушариях [1]. Уже в XXI в. на основе 90-летнего массива данных за о землетрясениях было определено, что именно на этих широтах происходит наибольшее количество землетрясений, являющимися результатом выхода избытка эндогенной энергии на фоне неравномерного сжатия пород в приполярных оболочках и растяжением их в экваториальной зоне [2]. Также к 350 с. ш. приурочен очаг гигантской квазикольцевой мантийной вихревой структуры в зоне Африкано-Аравийского сочленения, где наблюдаются магнитные и гравитационные аномалии, на которые чутко реагировала палеофауна [3], [4]. Однако специфика естественнонаучных исследований со второй половины XX века подразумевала преимущественно региональный охват работ, обходя стороной вопросы глобального функционирования и взаимодействия геосистем и уделяя лишь небольшое значение масштабным тектоническим явлениям, обладающим колоссальным энергетическим потенциалом. Необходимо понимать, что такие глобальные тектонические явления, будучи частью морфолитогенной основой, являются важным компонентом, фундаментом для формирования и самоорганизации геосистем разных уровней [5].

2.Материалы и методы.

Для исследования было выбрано 4 профиля, проведенных вдоль меридианов от 40° до 30° с.ш. через известные с древних времен города Гибралтар, Пальмира, Багдад, Пекин (с небольшим отступом на запад или восток, чтобы избежать погрешностей природных показателей из-за

особенностей урбосистем). Каждый из этих профилей находится в разных климатических секторах (соответственно приморский субтропический, аридный континентальный и субтропический муссонный), а на протяжении 10° с севера на юг не наблюдается кардинальных смен климатических поясов и, как следствие, природных зон. Для каждого такого профиля были визуализированы значения абсолютной высоты по данным глобальной цифровой модели рельефа ЕТОРО с разрешением 30 угловых секунд, значения относительной влажности, усредненные за период наблюдений 1979-2022 гг. по данным NOAA, а также значения альбедо, полученные с метеорологического спутника Suomi NPP (NASA) за апрель 2016 г.



Рисунок 1. Стандартное отклонение среднего годового значения относительной влажности в % для ячейки 30°-40° с. ш

Рассматриваемые показатели (рельеф, относительная влажность и альбедо) представляют 3 компонента природно-территориального комплекса: морфо-литогенную основу, климат и почвенно-растительный покров. Последнее вкупе с орографией оказывает аэродинамическое сопротивление воздушному потоку, которое согласно теории подобия Монина-Обухова учитывается параметром шероховатости и высотой слоя вытеснения, задавая особые условия в тепловом балансе [6]. Состояние же растительного покрова в регионах с недостаточным увлажнением (к которым можно отнести и значительную часть суши пояса Веронне) весьма сильно влияет на тепло- и влагообмен с атмосферой [7], [8]. Альбедо же влияет на отраженную радиацию (важный компонент теплового баланса) [9], поэтому в качестве доступного параметра почвенно-растительного покрова в этом исследовании применяется этот показатель.

Дата съемки для получения характеристики отражательной способности выбрана по двум причинам. Во-первых, альбедо поверхности с учетом особенностей растительного покрова для аридных регионов (к которым относятся Гибралтар, Пальмира, Багдад) рассчитывается в период активной вегетации, т. е. в апрель [6]. Во-вторых, год съемки определен на основании выбора наименьшего стандартного отклонения средних годовых значений относительной влажности для общей ячейки между 400 и 300 с. ш. на интересующих нас меридианах в период после 2010 г. (Рисунок 1).

Выгруженные данные обрабатывались стандартными инструментами в MS Office Excel 2007. 3.Результаты.

Как было упомянуто выше, такие планетарные тектонические структуры в виде линии напряженности земной коры, мантийных вихрей проецируются на дневной поверхности, формируя различные формы рельефа [5], в т. ч. и. Еще в 1888г. А.А. Тилло [10] обнаружил, что в полосе между 400 и 200 с.ш. на суше преобладают горные системы. Однако, при детальном профилировании по современным данным ЦМР выделяется локальное понижение в области 34,5-36,50 с. ш. в разных концах Евразии (Рисунок 2).



Рисунок 2. Профили высот по меридианам по данным ЕТОРО. Пунктиром даны линии полиномиального тренда

Визуализировав средние значения относительной влажности, рассчитанной за годы наблюдений (1979-2022), можно заметить следующее: на всех рассматриваемых меридианах происходит резкий "слом" хода значений влажности. Точки экстремумов графиков полиномиальных трендов располагаются в зоне 350-36,50 с. ш. (Рисунок 3).

В этой же зоне (350-370 с. ш.) наблюдается некий "провал" значений альбедо (Рисунок 4), что говорит об изменении характера почвенно-растительного покрова в сторону увеличения проективного покрова растительности.



Рисунок 3. Изменение значений относительной влажности (%) по меридианам в зоне 30°-40° с. ш. (по данным NOAA в период 1979-2022 гг.)



Рисунок 4. Изменение значений альбедо по меридианам в зоне 30°-40° с.ш. (по данным метеорологического спутника S-NPP, апрель 2016 г.)

3.Выводы. Процессы в геосистемах разных уровней имеют отклик на тектоническую аномалию, поэтому необходимо проводить дальнейшие исследования о связи геосфер вдоль 35-й параллели. Даже визуализация весьма округленных значений только 3-х физико-географических параметров, рассмотренных в этой статье, указывает на локальную аномалию в полосе 34-36,5 град. с. ш. -— т. е. вдоль критической с точки зрения глобальной тектоники широты. В будущем необходимо будет увязать тектонические аномалии, их проявления в ПТК высоких рангов (в т. ч. и сопровождаемые колоссальными выбросами эндогенной энергии и потоками вещества) и ландшафтную низких рангов, чтобы выявить образования, ПТК мозаичность более специфику функционирования, закономерность распределения и взаимосвязи компонентов комплексов и дать прогноз на развитие и оптимальное использование геосистем в поясе Веронне.

Литература/References:

1. Ретеюм А.Ю. Научный поиск: Теория, метод, результат // МЕТОД: Московский ежегодник трудов из обществоведческих дисциплин: Сб. науч. тр. / РАН. ИНИОН. — Т. 8. — М.: ИНИОН РАН, 2018. — С. 312–350.

2. Левин Б. В., Сасорова Е.В., Доманский А.В. Свойства, вариации мира и сейсмичность Земли // Вестник ДВО РАН. 2013. №3 (169).

3. Эппельбаум Л.В., Бен-Аврахам Ц., Кац Ю.И. [и др.] Гигантская квази-кольцевая мантийная структура в зоне Африкано-Аравийского сочленения: данные комплекса геологических и геофизических исследований / Геотектоника. – 2021. – № 1. – С. 662-93.

4. Yancey T.E., Wilson M.A., Mione A.C.S. The Ramonalinids: a new family of mound-building bivalves of the Early Middle Triassic // Paleontology. 2009. V. 52. P. 1349–1361.

5. Кашик Д.С., Литвинова Т.П., Тихомиров Н.С. Синергетика системы планета Земля и её энергообеспечение / Геология, геоэкология, эволюционная география: Коллективная монография / Под редакцией Е.М. Нестерова, В.А. Снытко. Том XVIII. – Санкт-Петербург: Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена, 2019. – С. 9-18.

6. Золотокрылин А.Н. Климатическое опустынивание: [монография] / Золотокрылин Александр Николаевич; Институт географии (Москва). - Москва: Наука, 2003. - 245, [1] с.

7. Gash J.H.C., Kabat P., Monteny B.A., Amadou M., Bessemoulin P., Billing H., Blyth E.M., deBruin H.A.R., Elbers J.A., Friborg T., Harrison G., Holwill C.J., Lloyd C.R., Lhomme J.-P., Moncrieff J.B., Puech D., Soegaard H., Taupin J.D., Tuzet A., Verhoef A. The variability of evaporation during the HAPEX-Sahel Intensive Observation Period. Journal of Hydrology. Volumes 188–189, 1997. Pages 385-399.

8. Titkova T.B., Zolotokrylin A.N. Monitoring of lands affected by desertification in the republic of Kalmykia // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2022. — Vol. 19, no. 2. — Р. 130–141.

9. Корнева И.А., Семенов С.М. Оценка влияния изменения альбедо земной поверхности на положение нулевой изотермы. Лёд и Снег. 2015;55(3):5-13.

10. Тилло А.А. О средней высоте материков и средней глубине морей // Изв. РГО. 1888. Т. 24. Вып. 6. С. 570-571.

ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКОВ ПЛОТНЫХ ВОД ПО МАТЕРИКОВОМУ СКЛОНУ ПРИ ИХ ОБРАЗОВАНИИ В ПОЛЫНЬЯХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА П.Н. Головин, М.С. Молчанов

ФГБУ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, г. Санкт-Петербург,

Россия golovin@aari.ru

Приводятся результаты исследования закономерностей развития и изменчивости интенсивности плотностных течений на шельфе и континентальном склоне, во всем геофизическом (наблюдаемом) диапазоне зимнего атмосферного форсинга, при котором происходит активное формирование АШВ в области вскрытия и существования квазтистационарных полыней (прибрежных, заприпайных, прибарьерных) различного типа – с открытой водной поверхностью и покрытых молодым льдом.

В качестве инструмента для исследования используются возможности численного моделирования в негидростатической постановке в развитии от мелкого масштаба до мезомасштаба. Выбранная модель Fluidity ICOM (the Imperial College Ocean Model) [1] позволяет численно моделировать процессы стока плотных вод по шельфу и склону на 3-D адаптивной неструктурированной сетке с автоматическим измельчением до заданных масштабов и с использованием негидростатической динамики.

Постановка 3-D численных экспериментов уже осуществлялась в [2] при моделировании мелкомасштабной динамики вод на шельфе и склоне в мезомасштабном (региональном) развитии.

Протяженность моделируемой области шельф-склон (ширина расчетного домена) составляет 10 км, длинна вдоль бровки шельфа - 6км, максимальной глубина - 1км. Расчетная область в 3-4 раза превышает радиус деформации Россби для области Антарктического склонового фронта. Полынья шириной 1 км располагалась в середине области шельфа. Таким образом, геометрически моделировалась или заприпайная или прибарьерная полынья. В численных экспериментах задается уклон шельфа и уклон материкового склона, величина которых совпадает с наблюдаемыми уклонами в одном из районов моря Содружества [3, 4, 5].

Внешний поток соли на поверхности задается как результат действия возникающей гравитационной конвекции, проникающей до дна, например, в области вскрытия под действием ветра заприпайной (или прибрежной) полыньи. Принятые начальные условия - отсутствие вертикальной стратификации (или она слаба) наблюдается в действительности в обширных областях шельфа - конвекция осолонения достигает дна в конце зимы.

Представленное исследование заключается в моделировании развития бароклинной динамики вод на шельфе и континентальном склоне во всем реально наблюдаемом - геофизическом диапазоне экстремальных метеоусловий образования и существования квазистационарных полыней в Антарктике. Исходя из космических наблюдений за ледяным покровом, атмосферного реанализа и инструментальных метеонаблюдений [6-12], диапазон атмосферного форсинга, способствующего наиболее интенсивному ледообразованию и инжекции солей в воду зимой, можно представить следующим диапазоном условий:

1. Полынья, покрытая молодым льдом толщиной 5-30 см (конжеляционная полынья) при ветрах $W \approx 2-7$ м/с и температуре воздуха - $Ta \approx -20 - -35$ °C, со статическим – вертикальным нарастанием льда на нижней поверхности.

2. Характерные условия вскрытия и поддержания полыньи с открытой водной поверхностью при отжимных (необходимое условие) ветрах $W \approx 12 - 16$ м/с и температуре воздуха - $Ta \approx -15 - 20^{\circ}$ С. Такие условия чаще возникают в результате прохождения атмосферных фронтов в циклонах зимой [13].

3. Суперэкстремальные условия вскрытия и сравнительно длительного поддержания квазистационарной полыныи с открытой водной поверхностью при отжимных ветрах $W \approx 16 - 30$ м/с и температуре воздуха - $Ta \approx -20 - -30$ °C. Такие условия в зимний период наблюдаются в отдельных районах Антарктических морей при воздействии на ледяной покров в прибрежных или прибарьерных районах шельфовых ледников сильных (и холодных) катабатических ветров, дующих с ледяного купола Антарктиды [13].

Все полыньи, имеющие ветровое происхождение, являются областями, где происходит экстремальная теплоотдача в атмосферу, особенно при существовании открытой водной поверхности, что обеспечивает наибольшую ледопродуктивность и интенсивное выделению рассола в воду [11]. Происходит значительное локальное (под полыньей) осолонение приповерхностного слоя, которое приводит к развитью активной соленостной конвекции [11] и интенсивному формированию плотных вод [10], которые распространяясь по шельфу, затем стекают по материковому склону.

В основе методики оценки ледопродуктивности и связанных с нею потоков соли в морскую воду в полыньях с открытой водной поверхностью в зимний период лежат балансовые

представления [14-16] когда теплота кристаллизации - Fкр выделяемая при образовании кристаллов внутриводного льда в приповерхностном турбулентном слое полыньи эквивалентна суммарным теплопотерям с открытой водной поверхности полыньи Q. Величина Q определялась для открытой водной поверхности квазистационарной прибрежной полыньи Дарнли в море Содружества в Антарктике во всем диапазоне зимних метеоусловий, способствующих существованию полыньи [17] на основе балансовой модели из [14], которая совпадает с подобными моделями, используемыми в [15, 16]. Расчеты выполнялись для температуры морской воды близкой к температуре замерзания [17]. Полученные оценки $Q \sim 1000 - 4000$ BT/м2 согласуется с подобными, основанными на многочисленных данных натурных наблюдений на полыньях в Антарктических морях [15,16] и подтверждается современными наблюдениями на полыньях в Антарктике [11].

Выполнены расчеты величин объемного удельного - ql в [м2/с] (на единицу длинны) потоков плотных вод в придонном слое на материковом склоне позволяют оценить возможный вклад каскадинга АШВ в образование донных вод при различных режимах стока. Результаты расчетов представлены в Таблице.

Полученная величина удельного потока ql на склоне в области полыньи, покрытой молодым льдом, оказалась близкой к оценке ql, основанной на данных натурных наблюдений [5], что так же подтверждает репрезентативность модельной оценки ql. Однако, в условиях существования полыньи с открытой водной поверхностью величина ql - почти в 2 раза, а при экстремальных метеоусловиях - почти в 3 раза больше. Т.е. при интенсификации образования АШВ в экстремальных метеоусловиях в области вскрытия и поддержания полыней с открытой водной поверхностью величина с открытой водной поверхностью величина ql - почти в 2 раза. Поэтом АШВ в экстремальных метеоусловиях в области вскрытия и поддержания полыней с открытой водной поверхностью величина потока плотных АШВ по склону может увеличиваться в 2-3 раза. Поэтому такие события необходимо учитывать при оценке объемов формирования донных вод в конкретных областях материкового склона близких к районам существования квазистационарных полыней в Антарктике за холодный период года, иначе будет значительная их недооценка. [18].

Таблица 1.

| Тип полыньи | Удельный поток – <i>q</i> _l , [м ² /c] |
|------------------------------------|--|
| Полынья, покрытая молодым льдом | 13.9 |
| С открытой водной поверхностью | 23.9 |
| С открытой водной поверхностью при | |
| экстремальных метеоусловиях | 30.3 |

Оценки интенсивности потоков плотных вод в верхней части материкового склона при их формировании в условиях существования в области шельфа полыней различного типа.

Получены модельные оценки удельного ql потоков АШВ на материковом склоне вблизи района существования квазистационарной прибрежной полыньи Дарнли в море Содружества, которые позволяют оценить возможный вклад каскадинга АШВ в образование донных вод при различных режимах стока. Они значительно (в несколько раз) превышают похожие оценки, выполненные ранее. Тем не менее, в настоящее время, эти оценки являются наиболее точными и корректными, что с одной стороны обеспечивается мелкомасштабной дискретностью вычислений, с использованием негидростатической модели Fluidity-ICOM, а с другой стороны - заданием наиболее репрезентативных внешних потоков соли (плавучести), учитывающих внутриводное ледообразование. Проведено исследование влияния увеличения пространственного шага вычислений X в численных экспериментах оценку ql. Увеличение X в 4 раза приводит к недооценке $ql_{,} \sim 30\%$. Таким образом, наиболее точными и корректными оценками ql на крутых материковых склонах могут быть только те, которые получены при постановке численных экспериментов с использованием мелкомасштабных негидростатических моделей. В крупномасштабных, и даже мезомасштабных (региональных) гидростатических моделях при значительной пространственной дискретности вычислений недооценка таких потоков может быть не приемлемой (в несколько раз). И еще больше возрастет, если не учитывать события вскрытия и существования полыней с открытой водной поверхностью, в которых происходит наиболее интенсивное формирование АШВ.

Благодарности/Acknowledgments:

Представленное исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда - грант № 22-27-00013, https://rscf.ru/project/22-27-00013/.

Литература/References:

1. Piggott M.D., Gorman G.J. et al. A new computational framework for multi-scale ocean modelling based on adapting unstructured meshes // Int. J. Numer. Meth. Fl. 2008. Vol. 56. P. 1003–1015, doi:10.1002/fld.1663.

2. Головин П.Н., Молчанов М.С. Мелкомасштабное моделирование динамики вод на шельфе и континентальном склоне в Антарктике // Метеорология и гидрология. 2022. № 6. С. 21-43.

3. Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Особенности глубоководного каскадинга на антарктическом материковом склоне (на примере моря Содружества) // Метеорология и гидрология. 2018. № 12. С. 81-93.

4. Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В., Молчанов М.С., Кашин С.В., Чистяков И.А. Пространственные закономерности стока плотных вод на антарктическом шельфе и материковом склоне // Метеорология и гидрология. 2022. № 11. С. 91-110.

5. Головин П.Н., Антипов Н.Н., Клепиков А.В. Сток антарктических шельфовых вод в летний период на шельфе и материковом склоне моря Содружества и их влияние на формирование донных вод Южного океана // Океанология. 2011. Т. 51. № 3. С. 393-408.

6. Fuseo G., Budillon G., Sperie G. Surface heat fluxes and thermohaline variability in the Ross Sea and Terra Nova Bay polynya // Cont. Shelf Res. 2009. № 29. P. 1887-1895.

7. Ohshima K.I., Fukamachi Y., Williams G.D., Nihashi S. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // Nat. Geosci. 2013. № 6(3). P. 235-240. doi: 10.1038/ngeo1738.

8. Snow K., Sloyan B.M., Rintoul S.R., Hogg A.M., Downes S.M. Controls on circulation, cross-shelf exchange, and dense water formation in an Antarctic polynya // Geophys. Res. Lett.

9. Snow K., Hogg A.M., Sloyan B.M., Downes S.M Sansitivity of Antarctic bottom water to changes in surface buoyance fluxes // J. Clim. 2016b. № 29. P. 313-330.

10. Williams G.P., Herraiz-Borreguero L., Roquet F., Tamura T., et al. The suppression of Antarctic bottom water formation by melting ice shelves in Prydz Bay // Nature communications. 2016. doi: 10.1038/ncomms12577.

11. Ackley S.F. et al. Sea-ice production and air/ice/ocean/ biogeochemistry interactions in the Ross Sea during the PIPERS 2017 autumn field campaign // Annals of Glaciology. 2020. Vol. 61(82). P. 181–195. https://doi.org/10.1017/aog.2020.31.

12. De Pace L.et al. Frazil ice growth and production during katabatic windevents in the Ross Sea, Antarctica // The Cryosphere Discussions. 2019. 15 p. doi:10.5194/ts-2019-213.

13. Головин П.Н. Роль квазистационарной заприпайной полыньи в формировании плотных шельфовых вод в зимний период и их последующем склоновом каскадинге (на примере моря Лаптевых) // Метеорология и гидрология. 2008. № 11. С. 57-75.

14. Монахов Е.И. Условия формирования внутриводного льда – Дис. к.г.н. фонды ФБГУ «РФ ААНИИ». 1989. 171 с.

15. Martin S., and Cavalieri D.J. Contributions of the Siberian shelf polynyas to the Arctic Ocean intermediate and deep water // J. Geophys. Res. 1989. Vol. 94. P. 12725-12738.

16. Cavalieri D.J. and Martin S. The contribution of Alaskan, Siberian, and Canadian coastal polynyas to cold halocline layer of the Arctic Ocean // J. Geophys. Res. 1994. Vol. 99. № C9. P.18343-18362.

17. Ohshima K.I., Fukamachi Y., Williams G.D., Nihashi S. et al. Antarctic Bottom Water production by intense sea-ice formation in the Cape Darnley polynya // Nat. Geosci. 2013. № 6(3). P. 235-240. doi: 10.1038/ngeo1738.

18. Головин П.Н., Молчанов М.С. Исследование изменчивости структуры и интенсивности плотностных течений в области шельф-склон в Антарктике // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2023. Т. 16. № 2. С. 44-63.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНИМОСТИ ОДНОМЕРНОГО ПРИБЛИЖЕНИЯ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ КРУПНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОДОЕМОВ Р.А. Ахтамьянов^{1,2}, Д.С. Гладских^{2,3,4}, Е.В. Мортиков^{3,4,5}, Н.В. Вазаева^{6,7}, Е.В. Татаринович¹

¹Гидрометцентр РФ, Москва, Россия

²Научно-Исследовательский Вычислительный Центр МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия
³Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия
⁴Московский центр фундаментальной и прикладной математики, Москва, Россия
⁵Институт вычислительной математики им. Г.И. Марчука РАН, Москва, Россия
⁶Институт физики атмосферы имени А. М. Обухова РАН, Москва, Россия
⁷МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Озера и водохранилища представляют собой важный объект исследования во множестве дисциплин наук о Земле. Взаимодействие озер и других геосистем охватывает различные пространственные и временные масштабы. Эти водные объекты не только вызывают интерес с точки зрения собственных уникальных характеристик, но и являются важными компонентами глобальных климатических моделей [1,2,3]. Специфика озер как объекта глобального климатического моделирования проявляется в их уникальной термогидродинамике и биохимических процессах. Для достижения высокой точности моделирования, необходимо тщательно подобрать параметры калибровки модели, а также детализировать описание основных географических особенностей рельефа водохранилища в численной сетке модели. Это важно, поскольку от уровня детализации описания рельефа зависит степень дисперсии значений в трехмерной модели по сравнению с одномерными усреднениями. Исследование термической структуры крупных внутренних водоемов с использованием одномерных приближений имеет высокий потенциал для улучшения точности глобальных моделей и углубления нашего знания о важной роли озер в климатических, экологических и гидрологических процессах.

Озеро Виктория и Рыбинское водохранилище представляют собой два уникальных объекта исследования в контексте моделирования термической структуры крупных внутренних водоемов. Выбор этих озер обоснован не только их географическими особенностями, но и различиями в климатических условиях и сезонной динамике термической структуры, что представляет интерес для сравнительного анализа и более глубокого понимания важных процессов в озерных экосистемах.

Озеро Виктория, расположенное в Восточной Африке, является одним из крупнейших озер в мире. Это озеро находится в экваториальной климатической зоне, характеризующейся высокими температурами и двумя сезонами дождей в году. Его термическая структура демонстрирует сложную сезонную динамику, связанную с воздействием смены режима атмосферной циркуляции ввиду сезонного смещения ВЗК.

Рыбинское водохранилище, расположенное в России, представляет собой крупное искусственное водохранилище в умеренной климатической зоне. Здесь климат характеризуется сильными сезонными изменениями температуры и осадков, что существенно влияет на термическую структуру водоема. Рыбинское водохранилище также имеет важное промышленное значение и используется водосбросами для регулирования водных ресурсов и электроэнергетики.

В данном исследовании использовалась трехмерная численная модель термогидродинамики замкнутого водоема [4,5,6], основой которой является осредненная по Рейнольдсу система уравнений термогидродинамики в приближении Буссинеска и гидростатики:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -A(u) + D_H(u, \lambda_m) + D_z(u, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x} \int_z^{\eta} \rho dz' + fv, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= -A(v) + D_H(v, \lambda_m) + D_z(v, K_m + v) - g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial y} \int_z^{\eta} \rho dz' - fu, \\ \nabla \cdot u &= \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= -A(T) + D_H(T, \lambda_h) + D_z(T, K_h + \chi'), \\ \rho &= \rho(T), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + (u_h \cdot \nabla_h)\eta = w.$$

Здесь u = (u, v, w) – вектор скорости, u_h – горизонтальные компоненты, ρ – плотность воды, T – ее температура; $K_m(\lambda_m)$ и $K_h(\lambda_h)$ – коэффициенты вертикальной (горизонтальной) турбулентной вязкости и температуропроводности соответственно; v, χ' – коэффициенты молекулярной вязкости и температуропроводности, η – отклонение свободной поверхности от равновесного состояния, *f* – параметр Кориолиса.

Averaged temperature time-scan (May - November 2022)



коэффициентов турбулентной Для расчета вязкости И диффузии используется двухпараметрическое замыкание, включающее прогностические уравнения на кинетическую энергию турбулентности и скорость ее диссипации [7,8].

Постановка задачи включала численное моделирование водных объектов с использованием трех различных методов для определения его формы и структуры. Целью было создание различных конфигураций модели озера Виктория и Рыбинского водохранилища с разной степенью детализации и точности, что позволяет провести сравнительный анализ и оценить влияние выбранного метода на результаты моделирования термической структуры и гидродинамики водоема. Ниже приведены примеры описания геометрической формы озера Виктория:

- Задание формы озера в виде параллелепипеда с боковыми сторонами размерами 325х275 километров и глубинами, составляющими 40 и 60 метров соответственно.
- Моделирование озера в форме параболоида с учетом заданных площадей сечения на определенных уровнях и учитывая соотношение осей эллипса, которые были определены на основе батиметрических данных.

Использование батиметрических данных озера Виктория с различным пространственным разрешением: 32x32x32 (~10 километров), 64x64x64 (~5 километров), 128x128x64 (~2.5 километра) и 256x256x64 (~1.3 километра).



В результате проведенного исследования было выявлено, что орографические особенности оказывают значительное влияние на термическую динамику озера Виктория. Существенные изменения средней температуры поверхности водоема были зарегистрированы при более детальном описании рельефа дна озера, что свидетельствует о высокой чувствительности модели к разрешению батиметрических данных. Уточнение рельефа дна озера позволяет более точно учесть воздействие топографических особенностей на распределение тепла в озере.

Дополнительно, при увеличении глубины озера, наблюдается увеличение градиента температуры в воде. Этот эффект свидетельствует о том, что глубокие озера подвержены более интенсивным изменениям температуры с увеличением глубины. Это может иметь важное значение при оценке процессов, происходящих в глубоких озерах. Таким образом, наши результаты подчеркивают необходимость учета орографии и глубины при моделировании озерных экосистем и их термической структуры.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ 23-77-01032.

Литература/References:

1. Heiskanen, J.J., Mammarella I., Haapanala S., Pumpanen J., Vesala T., MacIntyre S., Ojala A. Effects of cooling and internal wave motions on gas transfer coefficients in a boreal lake // Tellus B.— 2014.— V. 66.

2. Ljungemyr P., Gustafsson N., Omstedt A. Parameterization of lake thermodynamics in a high-resolution weather forecasting model // Tellus A. – 1996. – V. 48. – P. 608-621.

3. Tranvik L.J., Downing J. A., Cotner J.B., Loiselle S.A., Striegl R.G., Ballatore T.J., Dil-lon P., Knoll L.B., Kutser T et al. Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate // Limnology and Oceanography - 2009 – vol. 54. – pp. 2298-2314.

4. Mortikov E.V., Glazunov A.V., Lykosov V.N. Numerical study of plane Couette flow: turbulence statistics and the structure of pressure-strain correlations // Russian J. of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. -2019. - V. 34, No 2. -P.1-14.

5. Гладских Д.С., Степаненко В.М., Мортиков Е.В. О влиянии горизонтальных размеров внутренних водоемов на толщину верхнего перемешанного слоя. // Водные ресурсы. – 2021. – Т. 48. № 2. – С. 155-163.

6. Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Stepanenko V.M. Numerical simulation of turbulent mixing and transport of biochemical substances in inland waters // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. -2020. -611(1). -P. 012013.

7. Gladskikh D., Ostrovsky L., Troitskaya Y., Soustova I. Mortikov E. Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 136. https://doi.org/10.3390/jmse11010136.

8. Soustova I.A., Troitskaya Y.I., Gladskikh D.S., Mortikov E.V., Sergeev D.A. A Simple Description of the Turbulent Transport in a Stratified Shear Flow as Applied to the Description of Thermohydrodynamics of Inland Water Bodies. Izv. Atmos. Ocean. Phys. 2020, 56, 603–612. https://doi.org/10.1134/S0001433820060109.

СОВМЕСТНЫЙ КОСМИЧЕСКИЙ И МОРСКОЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО РЕГИСТРАЦИИ СЛЕДА НАДВОДНОГО СУДНА

В.Н. Носов¹, А.Н. Ядренцев², С.Г. Иванов¹, С.Б. Каледин³, Т.В. Глебова¹, А.А. Шпаковский²

¹Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, Москва, РФ ²ЦПК им. Ю.А. Гагарина, Моск. обл.

³Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, РФ ⁴НИЦ РЭВ ВМФ, Санкт-Петербург

ivanovsg5167@yandex.ru

ГЕОХИ РАН в период 2013-2015 г.г. был участником космического эксперимента (КЭ) «Экон-Л», выполненного в рамках НИР «Русло-2020» совместно с ОАО «РКК «Энергия» им. С.П.Королева, ЦПК им. Ю.А.Гагарина и НИЦ РЭВ ВМФ. Целью данных работ являлось исследование возможностей цифровой фоторегистрации с борта МКС следных аномалий от движущихся надводных судов. В соответствие с ТЗ на НИР ГЕОХИ РАН выполнял морскую составляющую эксперимента, которая включала организацию движения выделенного ВМФ корабельного обеспечения, своевременное инициирование светодымовых маркеров для ориентации космонавтов на борту МКС и контрольное измерение следных аномалий с помощью судового лазерно-оптического комплекса ГЕОХИ РАН, расположенного на судне - постановщике следа. Кроме того, на ГЕОХИ РАН возлагалась разработка алгоритмов и программного обеспечения обработки полученных космических снимков. ОАО «РКК «Энергия» выполняла необходимые баллистические расчеты, ЦПК - обучение экипажей космонавтов и информационный обмен с ними в период проведения экспериментов, НИЦ РЭВ ВМФ – контролировало выделение судового обеспечения и измерений гидрометеорологических параметров в районе проведения работ.

Эксперименты проводились на морском полигоне вблизи г. Феодосия. Его местоположение обозначено на карте Крымского побережья, приведенной на рис. 1. Траектории полета МКС показаны: синей линией - восходящая ветвь орбиты, красной линией - нисходящая ветвь. Положение выделенных судов на акватории в разные моменты выполнения эксперимента обозначено отметками НК-1 (гидрографическое судно) и НК-2 (постановщик следа).

Съемка с борта МКС выполнялась цифровыми фотокамерами, входящими в оснащение станции. При съемке использовалась короткая выдержка 1/8000с. Размер экспонируемого кадра составлял от 8х12 км², пространственное разрешение – от 2,5 м.

Всего было выполнено 18 сеансов КЭ. Из них 5 - в 2013 г., 7 - в 2014 г. и 6 - в 2015 г. Получено и обработано 578 снимков в полутоновым изображении и 69 снимков в области зеркального блика. На полутоновых снимках следные аномалии выделены на 17 снимках, т.е. в 3,4% случаев, а на зеркально-бликовых снимках следные аномалии выделены на 52 снимках, т.е. в 75,4% случаев. Это позволило сделать вывод об оптимальности регистрации следных аномалий на морской поверхности в зоне зеркального блика.



(а) Рисунок 1. Место проведения КЭ и направления полета МКС

В состав лазерно-оптической аппаратуры контроля следных образований с борта судна – постановщика входили: сканирующий лазерный локатор для измерения статистических характеристик морского волнения, аэрозольный лидар – для регистрации параметров приводного аэрозоля и фотометр яркости моря - для измерения оптических характеристик приповерхностного слоя морской среды.

ВЛИЯНИЕ ПОДВОДНОГО ХРЕБТА НА ПЕРЕМЕЩЕНИЕ АНТИЦИКЛОНИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НАД НАКЛОННЫМ ДНОМ ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ЖИДКОСТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ТОПОГРАФИЧЕСКОГО БЕТА-ЭФФЕКТА

Д.Н. Елкин, А.Г. Зацепин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

dmelkin@mail.ru

При наблюдениях за эволюцией «Севастопольского» антициклонического вихря в Черном море, перемещающимся вдоль изобат над континентальным склоном в юго-западном направлении было обнаружено, что движение вихря замедляется в области подводного хребта, образованного локальным поднятием батиметрии между двумя каньонами – палеоруслом Дуная и палеоруслом Западного Днепра. В связи с этим была поставлена задача лабораторного экспериментального исследования влияния подводного хребта расположенного на наклонном дне и направленного вдоль склона на антициклонические вихри, перемещающиеся вдоль изобат за счет топографического бета-эффекта [1, 2].

Эксперимент производился в цилиндрическом бассейне, сделанном из оргстекла, размещенном в центре платформы, в который был вставлен вписанный конус вершиной вверх. Угол между образующей конуса и горизонталью составлял 15°. Бассейн заполнялся однородной по плотности водой, пресной, или с определенной соленостью, не более 4 ‰. Высота слоя жидкости в бассейне составляла так, что вершина конуса находилась под поверхностью воды. Антициклонические вихри создавались с помощью локального источника постоянного расхода воды той же плотности, что в бассейне - баротропные вихри, или, меньшей плотности (солености) - бароклинные вихри. Этот источник представлял собой вертикальную трубку, конец которой располагался на поверхности водного слоя на расстоянии половины радиуса бассейна от его центра. Он снабжался водой из закрепленной на стойке платформы объемной бюретки, заполненной пресной водой, подкрашенной красителем в ярко синий цвет. Половина опытов проводилась над гладким конусом, а другая половина - при наличии закрепленного на поверхности конуса вдоль его образующей хребта. Хребет представлял собой правильную

треугольную призму, и лежал так, что одна боковая грань располагалась поверхности конуса. Он находился на расстоянии от источника, приблизительно равном радиусу бассейна в антициклоническом направлении (по часовой стрелке) и его высота по отношению к общей глубине слоя воды в области распространения вихрей составляла 0.1-0.2. Хребет представлял собой небольшое препятствие, приблизительно подобное своему черноморскому аналогу. Для видеозаписи опытов сверху, на платформе имеется верхняя видеокамера, а для видеозаписи сбоку - боковая видеокамера.

Перед началом опыта включалось циклоническое (против часовой стрелки) вращение платформы. Когда вода в бассейне раскручивалась до состояния твердотельного вращения, включались видеокамеры, и источник, через который пресная вода с квазипостоянным расходом поступала в приповерхностный слой воды. Под источником образовывался антициклонический вихрь, достигавший дна в баротропном случае, а в бароклинном -заканчивался на некоторой глубине. Но и в этом случае, из-за закона сохранения потенциального вихря, под бароклинным вихрем формировалась антициклоническая вихревая колонка, достигавшая дна. Вследствие топографического бета-эффекта баротропные и бароклинные вихри, образующиеся под источником достигая определенного диаметра «уходили» из под источника и перемещались над конусом в «западном» - антициклоническом направлении. По поверхности водного слоя рассыпались мелкие бумажные пелетки, видеосъемка перемещения которых позволяла определить скорость орбитального вращения воды в вихрях.



Рисунок 1. Схема экспериментальной установки. 1 – вращающаяся циклонически платформа; 2 – цилиндрический бассейн из оргстекла; 3 – усеченный конус; 4 – хребет; 5 – объемная бюретка с краном; 6 – трубка; 7 – видеокамера сверху; 8 – видеокамера сбоку; 9 – вытекающая из источника вода и образующиеся под ним антициклонические вихри

После каждого опыта, на основе обработки данных видеосъемки, определялись следующие параметры вихревого течения: трансляционная скорость распространения вихрей от источника в антициклоническом направлении; максимальная орбитальная скорость вращения воды в вихрях; радиус вихрей (по расстоянию от центра вихря до орбиты максимальной скорости); влияние хребта на параметры вихревого течения.

На рисунке 2 изображены кадры видеосъемки распространения вихревого течения в антициклоническом направлении над конусом без хребта и с хребтом, соответственно, в одни и теже моменты времени. Хребет сильно замедляет распространение вихревого течения и способствует разрушению индивидуальных вихрей. Расчеты показали, что при пересечении хребта азимутальная скорость вихревого течения уменьшается в два раза и более. Наиболее сильное замедление течения происходит в случае баротропных вихревых колонок. Плотностная стратификация несколько ослабляет действие топографического бета-эффекта, но не подавляет его полностью. Хребет уменьшает глубину проникновения бароклинного вихревого течения и уменьшает величину орбитальной скорости вихрей. Схема прохождения антициклонического вихря над хребтом показана на рисунке 3. Рисунок 3а отображает момент времени, когда вихрь (обозначен буквой «А») подходит вплотную к хребту. Стремясь перемещаться вдоль изобаты, заползая на хребет, антициклонический вихрь смещается вниз по склону. При этом выше него образуется циклонический вихрь (обозначен буквой «С») меньшего диаметра (рисунок 3б). Данная вихревая пара имеет тенденцию к перемещению в циклоническом направлении, поэтому перемещение антициклона в антициклоническом направлении, поэтому перемещение антициклона в антициклоническом осравнению с циклоном, он «прокручивает» последний вокруг себя (рисунок 3в). В конце концов оба вихря пересекают хребет (рисунок 3г). Вскоре после этого циклон диссипирует, а антициклон в ослабленном виде продолжает перемещаться в антициклоническом направлении за счет топографического бета-эффекта.



Рисунок 2. Вид сверху: а-г) Опыт без хребта: а) 12 лаб. сут. б) 18 лаб. сут. в) 42 лаб. сут. г) 66 лаб. сут. дз) Опыт с хребтом: д) 12 лаб. сут. е) 18 лаб. сут. ж) 42 лаб. сут. з) 66 лаб. сут. Соленость воды в бассейне S=1 ‰



Рисунок 3. Схема прохождения антициклонического вихря над хребтом (пояснение в тексте)

В целом, результаты эксперимента подтвердили натурные наблюдения, а также результаты численного моделирования [3] влияния вдольсклонового подводного хребта, расположенного в западной части Черного моря на процесс распространения и орбитальную скорость «Севастопольского» антициклонического вихря.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ №21-77-10052 и в рамках темы госзадания FMWE-2021-0002.

Литература/References:

1. Зацепин А.Г., Дидковский В.Л. Об одном механизме формирования мезомасштабных вихревых структур в склоновой зоне океана. – ДАН, 1996. Т.347. N1. C.109-112.

2. Зацепин А.Г., Дидковский В.Л., Семенов А.В. Автоколебательный механизм формирования периодической вихревой структуры от стационарного локального источника на наклонном дне во вращающейся жидкости. - Океанология. 1998. Т.37. N1.

3. Kubryakov A.A., Mizyuk A.I., Stanichny S.V. Stationarity and separation of the Sevastopol eddies in the Black Sea: the role of eddy-topographic interaction and submesoscale dynamics // Journal of Marine Systems, 2023, V. 241, 103911.

ГЕНЕРАТОР УФ ИЗЛУЧЕНИЯ И ОЗОНА ДЛЯ БАКТЕРИЦИДНОЙ ОБРАБОТКИ ПАТОГЕНОВ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ М.А. Котов¹, Н.Г. Соловьев¹, А.Н. Шемякин¹, М.Ю. Якимов¹, О.В. Калмантаева², М.А. Макарова², О.Ю. Манзенюк²

¹Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия ²ФБУН Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии, п. Оболенск,

Россия

kotov@ipmnet.ru

Бактерицидное действие ультрафиолетового (УФ) излучения на биологические объекты (клетки, бактерии, вирусы и др.) является общеизвестным, т.к. оно способно привести к необратимым повреждениям в клетке за счет фотохимических реакций. Как правило, под этим в первую очередь понимают нарушение структур бактериальной и вирусной ДНК и РНК, а также белков и других их компонентов [1, 2]. Можно сказать, что универсальный характер действия УФ излучения на микроорганизмы приводит к индукции летальных мутаций и гибели практически всей (99,9%) микробной популяции [3]. Газ озон (ОЗ) является очень сильным окислителем, он способен уничтожать практически все известные живые микроорганизмы и их формы [4, 5].

В сложных условиях агрессивных сред некоторые виды вирусов и микроорганизмов на поверхностях носителей могут объединяться в специальные структуры, например, биопленки, что позволяет сохранять свою жизнеспособность и более эффективно противостоять внешнему воздействию [6]. На сегодняшний день ситуация с лечением инфекций усугубляется появлением штаммов с множественной устойчивостью к антибактериальным препаратам [7]. Бактерицидная обработка УФ излучением и озоном может стать одним из самых эффективных способов ингибирования роста и инактивации микробиологичестких структур патогенов. Для исследования бактерицидного воздействия, как обособленного, так и комплексного, был сконструирован специальный генератор (рисунок 1) с ртутной лампой низкого давления, позволявший облучать исследуемые образцы на длинах волн 254 и 185 нм. При излучении 185 нм в воздушной среде, в которой проводились эксперименты, образовывался озон, влияние которого на исследуемый образец можно было как совместить с УФ облучением, так и обособить от него с помощью специальной заглушки.



Рисунок 1. Фотография облучателя: 1 – ртутная лампа низкого давления; 2 – концентратор излучения; 3 – облучаемый образец (ячейки с микроорганизмами); 4 – система откачки/подачи газов; 5 – эксикатор

Эксперименты проводились в ламинарном боксе с включенным и выключенным воздушным потоком, что позволяло отсечь влияние озона, образующегося под излучением 185 нм, на облучаемый образец. Обработка озоном осуществлялась с помощью металлической заглушки, отражающей и поглощающей УФ излучение лампы, которая ставилась над образцом.

Для оценки плотности излучения были проведены расчеты распространения излучения в диффузно отражающем концентраторе и без него. Использовался метод ray tracing в программной среде Comsol [8, 9]. Распределение интенсивности излучения на обрабатываемом образце представлено на рис. 2. Можно сказать, что в эксперименте с организацией УФ облучения образца от ртутной лампы низкого давления с потребляемой мощностью 5 Вт среднее значение плотности излучения на 253.7 нм доходило до $686 \cdot 10^{-2}$ мВт/см². Всего на площадь всех восьми ячеек чашки образца приходит 54.89 мВт (5.489 % от мощности всего исходящего излучения). Без использования концентратора значение составляло 29.52 мВт (2.952 %).



Рисунок 2. Двумерное распределение рассчитанной плотности излучения на 253.7 нм

В [10, 11] содержатся данные о зависимости энергетических уровней и излучательных переходов атома ртути от типа лампы и ее потребляемой мощности. Показывается, что соотношение между линиями 185 нм и 253.7 нм составляет примерно 1:5, из чего следует, что если излучение ртутной лампы с потребляемой мощностью в 5 Вт на 253.7 нм оценивать в 1 Вт, на 185 нм оно может составлять не более 0.09 Вт. В силу поглощения в воздухе (водяные пары, углекислый газ) влиянием такого излучения можно пренебречь.

Представленная конструкция облучателя способна работать в трех режимах: УФ облучение, воздействие озоном и их совмещение. В нем также используется специальный концентратор для улучшения эффективности бактерицидного воздействия за счет диффузного рассеяния УФ излучения и увеличения его дозы непосредственно на обрабатываемых образцах. Проведенные численные оценки плотности попадающего на образцы излучения подтверждают данный эффект

Благодарности/Acknowledgments:

Работа поддержана грантом РНФ 23-25-00459.

Литература/References:

1. Kowalski W. Ultraviolet germicidal irradiation handbook: UVGI for air and surface disinfection. – Springer science & business media, 2010.

2. Reed G. The history of ultraviolet germicidal irradiation for air disinfection. Pubic Health Rep. 2010, 125, 15–27.

3. Миллер Д. Эксперименты в молекулярной генетике: Пер. с англ. – Мир, 1976.

4. Nogales C.G. et al. Ozone therapy in medicine and dentistry //J Contemp Dent Pract. – 2008. – T. 9. – №. 4. – C. 75-84.

5. Moore G., Griffith C., Peters A. Bactericidal properties of ozone and its potential application as a terminal disinfectant //Journal of food protection. $-2000. - T. 63. - N_{\odot}. 8. - C. 1100-1106.$

6. Lewis K.I.M. Riddle of biofilm resistance //Antimicrobial agents and chemotherapy. – 2001. – T. 45. – №. 4. – C. 999-1007.

7. Flemming H.C., Wingender J. The biofilm matrix //Nature reviews microbiology. $-2010. - T. 8. - N_{\odot}. 9. - C. 623-633.$

8. Kotov M.A. et al. Increase in illumination of 253.7 nm in a cylindrical PTFE cavity //Processes in GeoMedia—Volume V. – Cham: Springer International Publishing, 2022. – C. 117-130.

9. Kotov M.A. et al. Symmetrization and amplification of germicidal radiation flux produced by a mercury amalgam UV lamp in cylindrical cavity with diffusely reflective walls //Symmetry. -2022. - T. 14. $- N_{\odot}$. 1. - C. 125.

10. Heering W. UV sources–basics, properties and applications //IUVA news. – 2004. – T. 6. – №. 4. – C. 7-13.

11. Schalk S. et al. UV-lamps for disinfection and advanced oxidation-lamp types, technologies and applications //IUVA news. $-2006. - T. 8. - N_{\odot}. 1. - C. 32$.

БИОЛОГИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ УФ ОБЛУЧЕНИЯ НА БИОПЛЕНКУ И СТРЕССОУСТОЙЧИВЫЕ ПОКОЯЩИЕСЯ ФОРМЫ Р. AERUGINOSA О.Ю. Манзенюк¹, М.А. Макарова¹, О.В. Калмантаева¹, В.В. Фирстова¹, М.А. Котов², А.Н. Шемякин², М.Ю. Якимов², Н.Г. Соловьев²

¹ФБУН Государственный научный центр прикладной микробиологии и биотехнологии, п. Оболенск,

Россия

²Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия manzenyukox@mail.ru

Цель исследования состояла в оценке бактерицидное воздействие длин волн 254 и 185 нм УФ спектра на биопленки и покоящиеся формы (ПФ) *Pseudomonas aeruginosa* ATCC9027. Штамм продуцирует белки- пигменты феназины, содержит гены, кодирующие белки острой инфекции LasI, LasR, rhlI, rhlR, рамнолипиды. Объектом исследования являлись микроорганизмы – биологические микрообъекты, устойчивые к факторам внешней среды: нагреванию, отсутствию питательных веществ (≤ 8 недель), антибиотикам, стандартному режиму УФ облучения воздуха в помещениях [1].

Штамм *Pseudomonas aeruginosa* АТСС9027 полученный из «ГКПМ-Оболенск», клонировали посредством 3-х последовательных пересевов единичной колонии на чашку Петри с плотной питательной средой №9 ГРМ (ФБУН «ГНЦ ПМБ»). Полученный таким образом бактериальный клон является генетически однородной культурой. Для верификации видовой принадлежности использовали метод белкового профилирования с применением масс-спектрометра MALDI-TOF Biotyper (Bruker, Германия). Затем единичную колонию суспендировали в 4 мл ГРМ бульона и выращивали на орбитальной качалке 120 об/мин при температуре 37 ⁰С для получения «планктонной» (ночной) культуры. Для формирования биопленок ночную культуру с концентрацией клеток ~1,6 ×10⁸ КОЕ/мл вносили в слайды с тонким дном (IBIDI 80826, Германия) по 200 мкл и инкубировали в термостате при 37 ⁰ С. Спустя 24ч и 48ч слайды с биопленкой подвергали УФ облучению (8 мин), равному бактерицидной дозе, определенной в предварительных экспериментах на планктонной (ночной) культуре. Параллельно готовили контрольные слайды с биопленками, которые не подвергались облучению.

Бактериальный клон *P. aeruginosa* выращивали в колбах объемом 100 мл с 50 мл среды № 9 ГРМ на орбитальной качалке 120 об/мин при температуре 37 ⁰С в течение 16 ч. Выращенные до стационарной фазы роста культуры затем разливали в пробирки типа Фалькон и инкубировали в

течение 2 мес. при комнатной температуре с доступом воздуха. Периодически из хранящихся культур отбирали пробы и определяли число жизнеспособных клеток. Для этого аликвоты десятикратных разведений хранящихся культур рассеивали на чашках Петри с агаризованной (10 г/л) средой №9 ГРМ, культивировали при 37 °С в течение 16 часов и подсчитывали число КОЕ/мл.

Для визуализации ДНК живых/мертвых клеток с помощью лазерной сканирующей микроскопии была использована комбинация флуоресцентных красителей ТОТО 1 (1 мкМ; время инкубации 15 мин; InvitrogenTM,T3600) и SYTO 60 (1 мкМ; время инкубации 15 мин; InvitrogenTM, S11342) как оптимальный метод окрашивания [3,4]. Для этого к биопленкам добавляли ТОТО-1 (в разведении 1:1500 по 100 мкл в лунку, время окрашивания 15 минут). Затем добавляли SYTO 60 (в разведении 1:1500 по 100 мкл в лунку, время окрашивания 15 минут). После чего проводили дважды отмывание и фиксацию образцов 2.5% раствором глутарового альдегида в какодилатном буфере (0.05 М раствор какодилата натрия, pH 7.0-7.5).

Микроскопические наблюдения и получение изображений выполняли с помощью лазерного сканирующего конфокального микроскопа OLYMPUS FV3000 с использованием масляного иммерсионного объектива x60 (Objective Lens UPLXAPO60XO 60.0X/1.518 Oil, N/A 1,42, U-DIC60). Для визуализации образцов использовали лазеры 488 нм (ТОТО-1) и 640 нм (SYTO 60). Для каждого образца получали конфокальные изображения пяти случайных полей живых/мертвых клеток, которые анализировались с помощью ImageJ [2].

УФ 185-280 нм, принадлежащий коротковолновому диапазону УФ-С (UVC), известен как бактерицидный агент для стерилизации помещений и оборудования, однако для антисептической обработки живых тканей *in situ* в клинической практике не применяется. С точки зрения риска возникновения световой эритемы кожи УФ-С излучение с длиной волны 207 нм примерно в 1000 раз безопаснее, чем излучение с длиной волны 250 нм [3]. С другой стороны, подобно антимикробным препаратам, доставка бактерицидного излучения к постоперационному внутритканевому очагу инфекции долгое время считалась трудной задачей. С развитием новых технологий в оптике это ограничение может быть преодолено за счет использования оптических волокон. В наших экспериментах мы применили экспериментальный прибор – источник излучения ИПМех РАН, в режиме прямого облучения биологических образцов на длинах волн 254 и 185 нм, а также в режиме обработки озоном.

Анализ количественного соотношение живых/мертвых клеток (24ч) биопленок *P. aeruginosa* показал, что воздействие исследуемого диапазона УФ приводило к 15-кратному увеличению мёртвых клеток *P. aeruginosa* по сравнению с контрольными лунками (Таблица1).

Таблица 1.

| Расчет | | Контроль | (без УФО) | УФО 8 мин | | | |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|---------------------------------|--|
| | Общее кол- во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | Общее кол-во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | |
| 1 поле | 11912 | 462 | 4 | 330 | 281 | 85 | |
| 2 поле | 11472 | 687 | 6 | 524 | 481 | 92 | |
| 3 поле | 12625 | 1158 | 9 | 325 | 304 | 94 | |
| 4 поле | 1769 | 86 | 5 | 331 | 311 | 94 | |
| 5 поле | 2880 | 118 | 4 | 140 | 108 | 77 | |
| Среднее значение | 8132 | 502 | 6 | 330 | 297 | 88 | |

Количественное соотношение живых/мертвых клеток биопленок P. Aeruginosa (24 ч).



Рисунок 1. Репрезентативные изображения пространственной организации биопленок P. aeruginosa (сформированные за 24 часа): слева контрольные клетки; справа – биопленка после воздействия УФО. Сторона кадра – 00 мкм

В таблице 2 представлены данные оценки бактерицидного действия УФО в отношении 48 ч биопленки *P. aeruginosa*. Количество мёртвых клеток составляло 63% по сравнению с контрольными лунками (10%). На рисунке 2 видно, что в контроле 48 ч биопленки представлены преимущественно живыми клетками *P. aeruginosa* (красный цвет). После облучения количество живых клеток значительно снижается и преобладают мертвые клетки (зеленый цвет).

Таблица 2.

| Количественное соотношение живых/мертвых клеток биопленок P. aeruginosa, (48 ч, | | | | | | | | |
|---|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|--|--|
| Расчет | Контроль (без УФО) | | | УФО 8 мин | | | | |
| | Общее кол- во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | Общее кол- во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | | |
| 1 поле | 509 | 93 | 18 | 1286 | 939 | 73 | | |
| 2 поле | 449 | 30 | 7 | 701 | 529 | 75 | | |
| 3 поле | 616 | 78 | 13 | 414 | 161 | 39 | | |
| 4 поле | 1583 | 113 | 7 | 464 | 324 | 70 | | |
| 5 поле | 903 | 49 | 5 | 454 | 273 | 60 | | |
| Среднее значение | 812 | 73 | 10 | 664 | 445 | 63 | | |





Рисунок 2. Репрезентативные изображения пространственной организации биопленок P. aeruginosa (сформированные за 48 часа): слева контрольные клетки; справа – биопленка после воздействия УФО. Сторона кадра – 100 мкм

Покоящиеся формы (ПФ) бактерий, как правило: (1) сохраняли жизнеспособность при длительном хранении (через 2 мес. хранения титр жизнеспособных клеток составлял ≈10⁷ КОЕ/мл) в провокационных условиях (отсутствие источников питания; 20 °С, доступ кислорода); (2) обладали терморезистентностью и антибиотикоустойчивостью; (3) приобретали отличительные особенности ультраструктурной организации (компактизованный нуклеоид, утолщенные клеточные оболочки) [5]. Таблица 3 представляет данные только УФ облучения и в режиме совместной обработки озоном.

| 1 | аблица | 3. |
|---|--------|----|
| | | |

| Расчет | Контроль (ПФ без УФО) | | | ПФ+ УФО 8 мин | | | ПФ+УФО+О3 |
|---------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| | Общее кол- во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | Общее кол-во клеток | Кол-во мертвых клеток | Процент мертвых клеток, % | Процент мертвых клеток, % |
| 1 поле | 1778 | 928 | 52 | 1347 | 643 | 48 | 93 |
| 2 поле | 2154 | 1307 | 61 | 1094 | 498 | 46 | 84 |
| 3 поле | 464 | 396 | 85 | 688 | 320 | 47 | 86 |
| 4 поле | 1016 | 794 | 78 | 678 | 363 | 54 | 70 |
| 5 поле | 835 | 408 | 49 | 1609 | 697 | 43 | 67 |
| Среднее значение | 1249 | 767 | 65 | 1083 | 504 | 48 | 80 |

| - IN UTAL MARKATING THE UTA CHARTELIAN THE CONTRACT AND THE OTHER A CHECK AND THE OTHER A CHECK AND THE OTHER A | Количественное соотношение | живых/мертвых клеток | P aerugino | sa (покояшаяся | і форма) |
|---|----------------------------|----------------------|------------|----------------|----------|
|---|----------------------------|----------------------|------------|----------------|----------|

УФ облучение вызывало умеренный бактерицидный эффект (50%) на ПФ *P. aeruginosa*, сравнимый с контрольными образцами. 65% мертвых клеток в конрольных образцах можно объяснить снижением жизнеспособных клеток в провокационных условиях отсутствия источников питания. Комплексное воздействие УФ и озона оказывало достаточно эффективное (80%) бактерицидное действие на ПФ формы *P. Aeruginosa*.



Рисунок 3. Репрезентативные изображения пространственной организации покоящихся форм Р. aeruginosa: справа контрольные клетки, середина – ПФ после воздействия УФО, слева – ПФ после воздействия УФО, сопряженного с выделением в зоне облучения озона

Сторона кадра – 100 мкм.

По результатам работы можно сделать следующие выводы: (1) Метод конфокальной микроскопии показал достоверные различия в оценке эффективности облучения между зрелой (48 ч) и растущей (24 ч) биопленками. Облучатель оказывает бактерицидное действие на биопленки *Pseudomonas aeruginosa*, вызывая гибель 88% клеток в биопленках 24 ч и 63% клеток в биопленках 48 ч. (2) Сопряженное воздействие УФ и озона оказывало 80% бактерицидное действие на покоящиеся формы *P. aeruginosa*. Облучение только УФ снижало эффект в 2 раза. В целом, бактерицидное действие только УФ указывает на необходимость коррекции спектрального состава УФ облучения по отношению стрессоустойчивым формам бактерий.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ (проект № 23-25-00459). Использование государственной коллекции патогенных микроорганизмов ГКПМ «Оболенск» для получения штаммов патогена P. aeruginosa и их покоящихся форм выполнено в рамках отраслевой программы Роспотребнадзора.

Литература/References:

1. Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях. Руководство. М.: Федеральный центр госсанэпиднадзора Минздрава России, 2005. 46 с. (Р 3.5.1904-04).

2. Nichele L. et al. Quantitative evaluation of ImageJ thresholding algorithms for microbial cell counting //OSA Continuum. $-2020. - V. 3. - N_{\odot} 6. - P. 1417-1427.$

3. Manuela Buonanno, Gerhard Randers-Pehrson, Alan W. Bigelow, Sheetal Trivedi, Franklin D. Lowy, Henry M. Spotnitz, Scott M. Hammer, David J. Brenner. 207-nm UV Light - A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. I: In Vitro Studies// PLoS ONE, 2013; 8 (10): e76968 DOI: 10.1371/journal.pone.0076968.

4. Okshevsky M., Meyer R. L. Evaluation of fluorescent stains for visualizing extracellular DNA in biofilms» // Journal of microbiological methods. - 2014. V. 105. P. 102-104.

5. Мулюкин А.Л., Сузина Н.Е., Дуда В.И., Эль-Регистан Г.И. Структурное и физиологическое разнообразие цистоподобных покоящихся клеток бактерий рода Pseudomonas //Микробиология. 2008. Т. 77, №4. С.512-523.

ОСОБЕННОСТИ РАСТЕКАНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ Т.О. Чаплина

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского, Москва, Россия <u>tanya75.06@mail.ru</u>

Интенсивная деятельность человека по освоению природных ресурсов Мирового океана включает разведку и добычу полезных ископаемых, транспортировку товаров, использование энергетических и биологических ресурсов, а также многие другие аспекты. Одним из последствий включения океана в сферу экономических интересов является возникновение и распространение загрязнений различного характера. Аварии с утечками нефти происходят при добыче, сборе и хранении нефти, из резервуаров, во время операций по сливу, отпуску нефтепродуктов потребителям, при транспортировке по трубопроводам и т.д. Количество утечек достигает больших значений и, по разным данным, колеблется от 5 до 17% от объема производства. При этом теряется не только ценное сырье, но и наносится значительный ущерб окружающей среде. Попадая в природные экосистемы, нефтяные углеводороды надолго вызывают нарушение биологического баланса.

В последние годы во всем мире предпринимаются большие усилия по совершенствованию системы предотвращения и ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов, но проблема по-прежнему остается актуальной. При планировании и проведении работ по борьбе с аварийными разливами углеводородов возникает необходимость прогнозирования распространения нефти в море. Такие прогнозы позволяют, в частности, предупреждать о возможности нефтяного загрязнения прибрежной зоны, о пересечении зон интенсивной хозяйственной деятельности нефтяным пятном, курсами судов и т.д. Распространение нефти в море при аварийных разливах представляет собой сложный процесс, для описания которого необходимо учитывать большое количество различных факторов.

Экспериментальному и теоретическому изучению растекания нефти и нефтепродуктов посвящена довольно обширная научная литература, как физико-техническая [1 – 9], посвященная проблеме описания динамики самого процесса, так и экологическая [10 – 12], направленная на решение возникающих проблем очистки морских районов, направлений.

В данной работе предложена упрощенная математическая модель, позволяющая исследовать основные динамические параметры процесса растекания. В этой модели химический состав и все термодинамические параметры среды считаются постоянными величинами, масса растекающегося пятна предполагается неизменной, все среды однородны и изотропны. Представлено сравнение с результатами лабораторных экспериментов по динамике разлива моторного масла и сырой нефти.

Растекание олеинов сопровождается рядом механических и термодинамических процессов. Поэтому при создании модели распространения необходимо учитывать следующие основные факторы, влияющие на динамику разлива: переход потенциальной энергии системы олеин-вода в кинетическую энергию из-за изменения геометрических характеристик разлива с течением времени; вязкое вовлечение воды в движение из-за касательных напряжений на границе олеин-вода, сопровождающееся замедлении горизонтального движения олеина; возникновение течения в воде, вызванного вертикальным смещением нижней границы разлива олеина; возникновение течения движения воды из-за явления сопротивления формы разлива олеина, сопровождающегося его движением в воде; изменение количества поверхностной энергии системы "олеин в воде" по причине изменения площадей контактных границ "олеин – вода", "олеин - воздух", "воздух - вода"; вязкие тепловые потери в олеине и воде.

Ниже приведен приблизительный расчет параметров разлива, модель которого основана на форме нефтяного пятна в виде диска, его радиус R(t) и толщина h(t) являются функциями времени. Структура потока масла внутри диска такова, что в верхней части частицы жидкого масла движутся вниз и от центра диска, а в нижней части – вверх и от центра диска, как показано на рисунке 1. Этот тип потока соответствует движению поверхностей пятна во время разлива: верхняя граница (граница раздела масло-воздух) перемещается вниз, а нижняя (граница раздела масло-воздух) перемещается вниз, а нижняя (граница раздела масло-воздух) перемещается вниз, а нижняя (граница раздела масло-возд) перемещается в верх.

Для описания энергетических соотношений системы нефть-вода используется модель нефтяного пятна, размещенного на поверхности воды, содержащейся в цилиндрической области радиуса R_w . Первоначально, в отсутствие нефти, глубина воды была равна H. Пусть в какой-то момент времени радиус нефтяного пятна равен R_0 , а толщина равна h. Координаты верхней и нижней границ нефтяного пятна во времени задаются значениями

 $z=h_{\pm}t$, так что толщина пятна равна

$$h(t) = h_{+}(t) - h_{-}(t) (1)$$

и его радиус равен R₀. Уровень свободной поверхности воды в это время обозначается символом *H*'. Одним из параметров проблемы является объем нефтяного пятна

$$V = \pi R_0^2(t)h(t) = \pi R_0^2(t)(h_+(t) - h_-(t)) = const (2)$$

который остается неизменным в течение всего времени разлива. На основе закона сохранения объема воды

$$\pi R_w^2 H + \pi R_0^2 (H' - h_-) = \pi R_w^2 H' (3)$$

и законе Архимеда

$$\pi R_0^2 (H' - h_-) \rho_w = \pi R_0^2 (h_+ - h_-) \rho_0 (4)$$

получаются необходимые соотношения

$$H' = H + \rho R_*^2 h, h_- = H - (1 - R_*^2)\rho h, h_+ = H + (1 - (1 - R_*^2)\rho)h$$
 (5)

где $\rho = \rho_0 / \rho_w, R_* = R_0 / R_w.$



Рисунок 1. Модель осесимметричного разлива нефти



В постоянном гравитационном поле потенциальная энергия системы, показанной на рисунке 2, с учетом (5) определяется соотношением

$$\Pi = \frac{\pi}{2}g[(R_w^2 - R_0^2)H'^2\rho_w + R_0^2h_-^2\rho_w + R_0^2(h_+ + h_-)h\rho_0] = \frac{\pi}{2}g[R_w^2H^2\rho_w + 2R_0^2Hh\rho_0 + R_0^2h^2\rho_0(1-\rho)]$$
(6)

Поверхностная энергия определяется выражением

 $E_S = \pi (R_w^2 - R_0^2)\sigma_{aw} + \pi R_0^2(\sigma_{ow} + \sigma_{oa}) = \pi R_w^2 \sigma_{aw} + \pi R_0^2(\sigma_{ow} + \sigma_{oa} - \sigma_{aw})$ (7) где σ_{ij} – коэффициент поверхностного натяжения на границе раздела -той и *j*-той сред.

Эксперименты проводились с различными типами органических и минеральных масел и непосредственно с сырой нефтью. Исследование динамики распространения несмешивающейся примеси по поверхности воды проводилось в прямоугольной кювете длиной 50 см, шириной 40 см и глубиной 5 см. Экспериментальный метод включал нанесение различных количеств моторного масла Volga M8B-SAE 20 API (($\rho_0 = 883.7 \text{ кг/м}^3, v_0 = 3.34 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{c}$, при температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$) и сырой нефти Мамонтовского месторождения (($\rho_0 = 878 \text{ кг/м}^3, v_0 = 2.15 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{c}$, при температуре $T = 20^{\circ}\text{C}$) на поверхность известного объема воды и дальнейший мониторинг ее распространения по поверхности жидкости.

Для устранения случайных ошибок экспериментальные данные были подвергнуты дополнительной обработке с использованием модифицированного алгоритма сдвига (MSA) [13], который показал стабильную работоспособность при выделении полезного сигнала на фоне шума вплоть до отношения сигнал/шум -15 дБ.

На рисунке 3 пунктирными (красными) точками показана экспериментальная зависимость площади разлива моторного масла Volga M8B-SAE 20 API от времени. Данные нормируются по своему максимальному значению, черные точки являются результатом обработки набора красных точек алгоритмом MSA. Все последующие экспериментальные данные, представленные здесь, также подвергались обработке алгоритмом MSA.



Рисунок 3. Экспериментальные (красные) и обработанные (черные) данные растекания машинного масла Volga M8B-SAE 20 API а. Аналитический результат б

Сырая нефть демонстрирует иное поведение, связанное с неограниченным разливом углеводородов, экспериментальные данные для которой показаны на рисунке 4 (а). Поскольку размеры лабораторной установки не позволяют отследить разлив на большой площади, как на рисунке 3, сравнение с теоретическими результатами проводится только за небольшие промежутки времени от начала процесса. Расчеты, представленные на рисунке 4 (б), показывают хорошее качественное совпадение эксперимента и теории.



Рисунок 4. Обработанные данные растекания машинного масла Volga M8B-SAE а. Аналитический результат б

Работоспособность полученного унифицированного уравнения динамики разлива олеина подтверждается сравнением с экспериментальными результатами, которые выявили те же режимы для разных типов олеинов, что и в теоретическом описании.

Благодарности/Acknowledgments:

Работы выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки №123021700046-4.

Литература/References:

1. Harkins W.D. The physical chemistry of surface films. 1952. Reinhold. New York.

2. Fay J.A. The spreading of oil slicks on a calm sea from oil on the sea. By ed. Hoult D.P. 1969. Plenum Press. New York, pp. 53 - 64.

3. Garrett W.D., Berger W.R. Environment Science Technologies. 1970. V. 4. P. 123.

4. Cross R.H., Hoult D.P. Collection of oil slicks. By ed. Waterways J. Harbours and coastal engineering division, A.S.C.E. 1971. V. 97. P. 313.

5. Hoult D.P. Oil spreading on the sea//Annual Review of Fluid Mechanics. 1972. V. 4, pp. 341 – 368.

6. Buckmaster J. Viscous-gravity spreading of an oil slick//Journal of Fluid Mechanics. 1973. V. 59. Part 3, pp. 481 – 491.

7. Huh C., Inoue M., Mason S.G. Unidirectional spreading of one liquid on the surface of another//Canadian Journal of Chemistry Engineering. 1975. V. 53, pp 367.

8. DiPietro N.D., Huh C., Cox R.G. The hydrodynamics of the spreading of one liquid on the surface of another//Journal of Fluid Mechanics. 1978. V. 84. Part 3, pp. 529 – 549.

9. Зырянов В.Н., Шурганова С.В. Растекание пятна нефти по поверхности моря с учетом выветривания// Процессы в Геосредах. 2015. № 1, С. 30 – 36.

10. Bayat A. Oil spill cleanup from sea water by sorbent materials // Chemical Engineering & Technology. - 2005. - V. 28(12). - P. 1525-1528.

11. Rethmeier J., Jonas A. Lignite based oil binder mats: a new absorbent strategy and technology // Spill Science & Technology Bulletin. – 2003. – V. 8(5-6). – P. 565–567.

12. Chaplina T.O., Stepanova E. V. Elimination of Hydrocarbons Spills on Water Objects and Fluorescent Diagnostics of Water Pureness // Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. – 2018. – P.17-28.

13. Солодкий Д.А., Кистович А.В. Модифицированный сдвиговый алгоритм обработки измерительных данных// Измерительная техника, 2014, № 11, С. 43 – 47. [Solodkii D.M., Kistovich A.V. Modified shift algorithm for processing measured data// Measurement Techniques, 2015, V.57, No. 11, pp. 1287-1292. doi: 10.1007/s11018-015-0622-5].

ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ МОДЕЛИ КОКСА-МАНКА ДЛЯ ОПИСАНИЯ ОТРАЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОГО СВЕТА МОРСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ И.П. Шумейко, А.Ю. Абрамович

Севастопольский государственный университет, г. Севастополь, Россия <u>shumeyko-irina-74@yandex.ru</u>

Большую часть сведений о процессах, протекающих в океане и приводном слое атмосферы, обеспечивают данные зондирования, поступающие с космических аппаратов. Взаимодействие электромагнитных волн с морской поверхности определяется ее шероховатостью, одной из основных характеристик которого являются уклоны [1]. В настоящее время основной моделью, описывающей распределения уклонов в задачах рассеяния света морской поверхностью, является модель Кокса-Манка (КМ) (Cox-Munk) [2], коэффициенты которой определены по полученным с самолета фотографиям солнечного блика. Модель построена на основе усеченных рядов Грама-Шарлье.

При пассивном зондировании в оптическом диапазоне, регистрируемый на спутнике сигнал определяют несколько основных механизмов: отражение морской поверхностью прямого солнечного излучения, также рассеянного атмосферой солнечного излучения, отражение морской поверхностью в произвольных направлениях прямого солнечного излучения, далее рассеянного атмосферой в сторону спутника. Для анализа оптических изображений необходимо знать границы областей, где доминирует тот или иной механизм, в первую очередь границы области солнечного блика [3].

Использование усеченных рядов Грама-Шарлье в модели КМ приводит к искажениям на хвостах распределения, где функция плотности вероятностей может принимать отрицательные значения [4]. Целью настоящей работы является уточнение границ области, внутри которой модель КМ корректно описывает морскую поверхность.

При анализе уклонов морской поверхности принято выделять две компоненты: продольную, ориентированную в направлении ветра и поперечную, которые обозначаются индексами с и *и*. В тех ситуациях, когда выражения соответствуют обеим компонентам, индекс отсутствует. Основной моделью описывающей двумерную функцию плотности вероятностей уклонов морской поверхности в задачах рассеяния света является модель KM, которая имеет вид

$$P(\xi_{u},\xi_{c}) = \frac{1}{2\pi\sigma_{u}\sigma_{c}} \exp\left(-\frac{\xi_{u}^{2}+\xi_{c}^{2}}{2}\right) \left\{1 - \frac{C_{21}}{2}H_{2}\left(\frac{\xi_{c}}{\sigma_{c}}\right)H_{1}\left(\frac{\xi_{u}}{\sigma_{u}}\right) - \frac{C_{03}}{6}H_{3}\left(\frac{\xi_{u}}{\sigma_{u}}\right) + \frac{C_{04}}{24}H_{4}\left(\frac{\xi_{c}}{\sigma_{c}}\right) + \frac{C_{22}}{4}H_{2}\left(\frac{\xi_{c}}{\sigma_{c}}\right)H_{2}\left(\frac{\xi_{u}}{\sigma_{u}}\right)\right\},$$

где σ_u и σ_c – среднеквадратические значения; коэффициенты с определяют отклонение от нормального распределения, первый индекс относится к поперечной компоненте уклона, второй к продольной; $H_n(\xi)$ – ортогональные полиномы Чебышева-Эрмита порядка *n*. В модели КМ старшая степень полином n = 4. Коэффициенты модели КМ имеют следующие значения: $C_{21} = 0.01 - 0.0086U \pm 0.03$, $C_{03} = 0.04 - 0.033U \pm 0.12$, $C_{40} = 0.40 \pm 0.23$, $C_{22} = 0.12 \pm 0.06$, $C_{04} = 0.23 \pm 0.41$, где U – скорость ветра на высоте 10 м, $\pm \delta C_{ij}$ – среднеквадратические отклонения.

Рассмотрим распределения продольной и поперечной относительно направления ветра компонент уклона, которым соответствуют сечения двумерной функции плотности вероятностей

 $P_u(\xi_u) = P(\xi_u, \xi_c = 0)$ и $P_c(\xi_c) = P(\xi_u = 0, \xi_c)$. Искажения на хвостах распределений $P(\xi)$ возникают в области $\xi > 2.5\sigma$ [2], где вклад членов, пропорциональных смешанным коэффициентам C_{21} и C_{22} , мал. Параметрами, определяющими корни функции для $P_u(\xi_u)$ являются C_{03} и C_{04} , для $P_c(\xi_c)_c C_{40}$. Достаточным условием существования корней функции $P_c(\xi_c)$ является выполнение неравенства $C_{40} < 0$. Корни функции $P_u(\xi_u)$ могут существовать при $C_{04} > 0$, если значение C_{03} достаточно велико.

В задачах рассеяния солнечного света на морской поверхности наряду с уклонами ξ , которые являются первой пространственной производной возвышений поверхности, необходимо знать углы наклона α . Между собой эти параметры α и ξ связаны соотношением $\alpha = \operatorname{arctg} \xi$. Под допустимыми углами наклонов для модели КМ подразумеваются углы α_u и α_c , соответствующие уклонам ξ_u и ξ_c .

Уровень шероховатости морской поверхности растет с ростом скорости ветра. Перейдем от корней функций $P_u(\xi_u)$ и $P_c(\xi_c)$ к углам наклонов α , используя полученные для модели КМ соотношениями, связывающими дисперсию уклонов и скорость ветра U:

 $\sigma_u^2 = 0.000 + 0.00316U \pm 0.004, \sigma_c^2 = 0.003 + 0.00192U \pm 0.002.$

Согласно измерениям уклонов, проведенных с помощью разных типов аппаратуры, установлено, что от скорости ветра зависит коэффициент C_{03} , коэффициенты C_{04} и C_{40} от скорости ветра не зависят [2, 5]. Ранее отмечалось, что отсутствие связи между коэффициентами C_{04} и C_{40} и скоростью ветра является одним из основных факторов, не позволяющих однозначно восстанавливать скорость приводного ветра по данным дистанционного зондирования со спутника [6]. Зависимости от скорости ветра границы области допустимых углов α_u и α_c , рассчитанные для нескольких характерных значений C_{04} и C_{40} показаны на рисунке 1.



Рисунок 1. Зависимости от скорости ветра W допустимых углов наклона морской поверхности а для модели КМ: а – зависимость $\alpha_u = \alpha_u(W)$, кривые 1-4 соответствуют изменению C_{04} от $\overline{C_{04}} - 3\delta C_{04}$ до $\overline{C_{04}}$ с шагом δC_{04} ; б – зависимость $\alpha_c = \alpha_c(W)$, кривые 1-3 соответствуют изменению C_{40} от $\overline{C_{40}} - 3\delta C_{40}$ до $\overline{C_{40}} - \delta C_{40}$ с шагом δC_{40}

Наиболее низкими допустимые значения углов α_u и α_c являются при слабом ветре, где они приблизительно равны 10°. Следует отметить, что диапазон скоростей 1-4 м/с характерен наиболее резким изменением дисперсии компонент уклонов, коэффициенты при W в регрессионных уравнениях $\sigma_u^2 = \sigma_u^2(W)$ и $\sigma_c^2 = \sigma_c^2(W)$ примерно в 3-4 раза больше, чем при более сильных ветрах [7]. При слабом ветре появляются слики естественного происхождения, в которых короткие волны, дающие основной вклад в дисперсию уклонов, подавлены. Это обстоятельство не учитывалось в модели КМ, и можно ожидать, что допустимые значения α_u и α_c лежат в области примерно до 25°.

Литература/References:

1. Запевалов А.С., Лебедев Н.Е. Моделирование статистических характеристик поверхности океана при дистанционном зондировании в оптическом диапазоне // Оптика атмосферы и океана, 2014. № 1. С. 28–33.

2. Cox C., Munk W. Measurements of the roughness of the sea surface from photographs of the sun glitter // J. Optical. Soc. America. 1954. V. 44. № 11. P. 838-850.

3. Лебедев Н.Е., Пустовойтенко В.В., Показеев К.В., Мельникова О.Н. Моделирование двулучевой функции отражательной способности морской поверхности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2014. Т. 11. № 3. С. 310–320.

4. Blinnikov S. and Moessner R. Expansions for nearly Gaussian distributions // Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 1998, Vol. 130, pp. 193–205.

5. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В. Статистические характеристики уклонов морской поверхности при разных скоростях ветра // Океанология. 1992. Т. 32, Вып. 3. С. 452-459.

6. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Смолов В.Е. О предельной точности скаттерометрического определения со спутника скорости ветра над океаном // Исследование Земли из космоса. 1987. № 2. С. 57-65.

7. Христофоров Г.Н., Запевалов А.С., Бабий М.В. Измерения параметров шероховатости морской поверхности при переходе от штиля к ветровому волнению // Известия Российской академии наук. Физика атмосферы и океана. 1992. Т. 28, № 4. С. 424-431.

КАЙНОЗОЙСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ РАЗРАСТАНИЯ ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЫ В КОТЛОВИНЕ АМУНДСЕНА (ЕВРАЗИЙСКИЙ БАССЕЙН, СЕВЕРНЫЙ ЛЕДОВИТЫЙ ОКЕАН)

А.А. Шрейдер, А.Э. Сажнева, А.Л. Бреховских, М.С. Клюев, И.Я. Ракитин

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

aschr@ocean.ru

Геологическое развитие Северного Ледовитого океана как части мировой хозяйственной системы нашей планеты уже многие годы привлекает внимание исследователей. Накоплен большой объём материала. Евразийский бассейн (Северного Ледовитого океана) состоит из двух вытянутых глубоководные котловины Нансена и Амундсена, разделенных срединно-арктическим хребтом Гаккеля. Котловина Амундсена расположена между хребтом Гаккеля и континентальным хребтом Ломоносова. Ее рельеф характеризуется большим размахом глубин дна от сотен до тысяч метров.

В докладе рассматриваются особенности строения рельефа дна, параметров седиментации и поверхности акустического фундамента в котловине Амундсена. Их комплексная геологогеофизическая характеристика позволила количественно оценить параметры кинематики развития котловины в кайнозое.

Более 70% исследуемых в настоящей работе точек анализа расположены на удалении свыше 200 км от современной оси спрединга в пределах океанической коры с глубиной дна свыше 3 километров и возрастом более 30 млн. лет

Интерпретация, полученных результатов, свидетельствует, что режим спрединга постепенно менялся в интервале 20- 30 млн. лет назад. При этом мощности осадочных пород в пределах коры с возрастом более 35 млн. лет испытывают значительные вариации в пределах от значений в сотни метров до 3-5 километров, а поверхность акустического фундамента в целом заглубляется от величин примерно 4 км при возрасте литосферы около 8 млн. лет до значений примерно 7 километров при возрасте более 50 млн. лет. Полученные результаты расчетов основываются на совместном изучении геохронологии дна, основанной на палеомагнитных аномалиях, и комплексном геолого-геофизического изучении результатов сейсмических исследований. Они дополняют ранее полученные сведения о кинематике дна Евразийского бассейна.

В результате в работе проведено первое систематическое изучение опубликованных сейсмических данных, несущих в пункте сейсмического зондирования сведения одновременно о рельефе дна, мощности осадков и поверхности акустического фундамента в совокупности с современными сведениями о возрасте океанической коры в котловине Амундсена. Расчеты показывают, что скорость поступления и распределения осадочного материала связана с неоднородностью распределения питающих провинций вдоль континентальной окраины Сибири. Интерпретация сведений о заглублении поверхности акустического фундамента подтверждает общепланетарную закономерность заглубления дна и океанической коры во времени и конкретизируют ее для котловины Амундсена, тем самым дополняя научные знания о кинематике дна Евразийского бассейна (Северный Ледовитый океан).

Благодарности/Acknowledgments:

Настоящая работа выполнена в рамках Государственного задания № FMWE-2021-0004.

ПРИБРЕЖНЫЕ АПВЕЛЛИНГИ И ДАУНВЕЛЛИНГИ, ОБУСЛОВЛЕННЫЕ ВИХРЕВОЙ ДИНАМИКОЙ ВОД В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ЧЕРНОГО МОРЯ А.Г. Зацепин, О.И. Подымов

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

zatsepin@ocean.ru

На основе анализа данных долговременных совместных измерений вертикальных распределений температуры, плотности и скорости течения на акватории полигона «Геленджик» в северо-восточной части Черного моря показано, что квазипериодические прибрежные неполные апвеллинги и даунвеллинги на шельфе и верхней части континентального склона на синоптическом временном масштабе (5-15 суток), связаны с изменениями направления и силы вдольберегового течения и геострофическим приспособлением поля плотности к полю скорости [1, 2]. Основной причиной изменения скорости вдольберегового течения является меандрирование Основного черноморского течения (ОЧТ), расположенного над континентальным склоном, и образование антициклонических и циклонических вихрей в меандрах соответствующего знака (рисунок 1).



Рисунок 1. Череда циклонических (С) и антициклонических (AC) меандров ОЧТ и вихрей в северо-восточной части Черного моря. Красными стрелками показаны знакопеременные вдольбереговые течения на шельфе и верхнейчасти континентального склона. Спутниковый снимок, Ландсат-8, 15 апреля 2015 г. (предоставлен С.В. Станичным, ФИЦ МГИ РАН)

Циклонические и антициклонические меандры медленно перемещаются вдоль берега с юговостока на северо-запад. Вследствие этого, в точке наблюдения на шельфе или в верхней части
континентального склона, возникает квазипериодическое изменение направления вдольберегового течения с северо-западного (циклонический меандр ОЧТ) на юго-восточное (антициклонический меандр ОЧТ, или антициклонический мезомасштабный вихрь). Полный период смены знака течения в среднем составляет около 10 суток. На фазе северо-западного течения перманентный пикно-халоклин (пикноклин) и сезонный термоклин (термоклин) опускаются (фаза даунвеллинга), что приводит к увеличению их толщины и толщины верхнего квазиоднородного слоя (ВКС). На фазе юго-восточного течения пикноклин и термоклин поднимаются (фаза апвеллинга) и сжимаются по вертикали, уменьшается также толщина ВКС.Установлены статистически значимые линейные зависимости вертикальных смещений изопикн и изотерм от скорости вдольберегового течения, позволяющие оценивать величину «геострофического» апвеллинга или даунвеллинга по данным измерений профиля скорости течения в верхней части континентального склона, на внешнем и внутреннем шельфе. Оценены значения амплитуды смещений изопикн в пикноклине и изотерм в термоклине, показана их квазисинфазность.

Важным общим следствием геострофического апвеллинга является приближение сезонного термоклина к поверхности моря, благодаря чему интенсивное воздействие ветра любого направления вызывает значительное турбулентное вовлечение термоклинных вод в ВКС, способствует его охлаждению и обогащению биогенными элементами. Результатом этого может быть повышенная первичная продуктивность: совпадение сильного ветра и геострофического апвеллинга должно оказывать синергетическое воздействие на первичную продуктивность прибрежной экосистемы.

Вертикальные колебания изопикн и связанные с этим изменения в положении нижней границы кислородной зоны и верхней границы сероводородной зоны, могут оказывать влияние на структуру биологических сообществ и глубину распространения бентоса на черноморском шельфе.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена по теме госзадания FMWE-2021-0002 и при поддержке гранта PHФ №23-17-00056.

Литература/References:

1. Зацепин А.Г., Островский А.Г., Кременецкий В.В. и.др. О природе короткопериодных колебаний основного черноморского пикноклина, субмезомасштабных вихрях и реакции морской среды на катастрофический ливень 2012 г. // ФАО. 2013. №6. С.717-732.

2. Podymov, O.I.; Ocherednik, V.V.; Silvestrova, K.P.; Zatsepin, A.G. Upwellings and Downwellings Caused by Mesoscale Water Dynamics in the Coastal Zone of Northeastern Black Sea. J. Mar. Sci. Eng. 2023, 11, 1628. https://doi.org/10.3390/jmse11081628.

ВЛИЯНИЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПРИ ОБТЕКАНИИ ЖИДКОЙ КАПЛЕЙ ТОНКОЙ НИТИ А.И. Федюшкин, А.А. Гневушев, А.С. Захаров, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва

<u>fai@ipmnet.ru</u>

В работе представлены результаты исследований авторов по динамике капли при обтекании тонкой нити в условиях невесомости и при нормальной силе тяжести Земли. Показаны характерные режимы обтекания каплей нити: отталкивание, удержание и протекание с фрагментацией и коалесценцией вторичных частей капели.

1.Введение.

Разрушение капель жидкостей при столкновениях с препятствием – это определяющий элемент современных технологий (нанесение покрытий, струйная печать, охлаждение поверхностей, впрыск топлива в двигатели, подача лекарств в очаг заболевания), а также определяющий фактор при проникновении капель жидкости через защитные маски, в связи с защитой людей от инфекционных заболеваний, передающихся воздушно-капельным путём [1 -

11]. Поэтому выявление общих закономерности динамики капли при её ударе о твёрдую поверхность, обтекании тонких нитей и протекании капли через отверстия является актуальной задачей.

Эксперименты и моделирование показали [4 - 6], что при ударе капли о твёрдую плоскую поверхность переход от растекания к разбрызгиванию происходит при числах Вебера $W_{e_i} > W_{e_i}^*$, где $W_{e_i}^* \subset (137,206)$. В работах [6, 7] представлены результаты численного моделирования обтекания тонкой нити каплей воды в воздушной среде при разных начальных скоростях капли, и было показано существования трёх режимов обтекания каплей нити в зависимости от скорости капли: отталкивание, удержание и протекание капли через тонкую нить. При поперечном центральном обтекании нити (диаметром $d_t = 0.1$ мм), капля воды (диаметром $d_i = 0.5$ мм) при скоростях: меньше $v_i < 0.1$ м/с – отталкивается нитью, при 0.1м/с $< v_i < 1$ м/с – удерживается нитью, а при $v_i > 2$ м/с – проходит через нить, разделяясь на части, которые затем за нитью могут сливаться. Результаты изучения течения каплей воды (диаметром $d_i = 2.68$ мм) пакета тонких смещенных 28 концентрических колец разного диаметра. Результаты показали наличие разных колец с фрагментацией и частичной коалесценцией). При скоростях капли до 1м/с рассмотренный пакета тонких колец ($d_t = 0.02$ мм) способен задерживать проникновение капли до 1м/с рассмотренный пакет тонких колец ($d_t = 0.02$ мм) способен задерживать проникновение капли воды диаметром $d_i = 2.68$ мм.

В данной работе показано влияние ускорения силы тяжести при обтекании каплей воды тонкой нити.

2.Постановка задачи и математическая модель.



Рисунок 1. Схема модели

3. Результаты.

силы тяжести). Центры капли и нити находятся на оси z, и в начальный момент поверхность капли расположена от поверхности нити на расстоянии равном радиусу нити $(d_t/2)$, и капля начинает движение вниз со скоростью v_i . Задача характеризуется безразмерными числами Рейнольдса $R_e = \rho v_i d_i / \mu$ и числом Вебера $W_{e_i} = \rho v_i^2 d_i / \sigma$, где ρ - плотность, v_i - скорость падения капли, d_i - диаметр капли, μ - вязкость, и σ – коэффициент поверхностного натяжения. Математическая модель основана на численном решении 2D уравнений Навье-Стокса для двухфазной системы «воздух-вода» в осесимметричном приближении методом контрольных объёмов с применением VOF метода, детали математической модели описаны в работах [10, 11]

Схема модели движения капли показана на рисунке 1 (H – высота, R – радиус цилиндрической расчётной области, z – ось симметрии, q –вектор ускорения

На рисунках 2-5 представлены результаты моделирования обтекания нити ($d_t = 0.2$ мм) каплей воды ($d_i = 4$ мм) с начальными скоростями $v_i = 0.1$ м/с и $v_i = 1$ м/с для условий невесомости и нормальной силы тяжести Земли. На рис. 2 для условий невесомости (g = 0 м/с²) показаны картины изменения формы капли ($v_i = 0.1$ м/с) при обтекании нити в интервале времени от $t_0 = 0$ до $t_1 = 73$ мс через равные промежутки времени. Капля ударяется о нить, отталкивается от нити в противоположную сторону, её форма деформируется и долго осциллирует до принятия сферической формы. На рисунке 3 для нормального ускорения силы тяжести Земли (g = 9.81 м/с²) показаны картины изменения формы капли ($v_i = 0.1$ м/с) при обтекании нити в интервале времени сферической формы. На рисунке 3 для нормального ускорения силы тяжести Земли (g = 9.81 м/с²) показаны картины изменения формы капли ($v_i = 0.1$ м/с) при обтекании нити в интервале времени сферической формы. На рисунке 3 для нормального ускорения силы тяжести 3емли (g = 9.81 м/с²) показаны картины изменения формы капли ($v_i = 0.1$ м/с) при обтекании нити в интервале времени. При увеличении начальной скорости капли ($v_i = 1$ м/с), капля обтекает нить в невесомости и на Земле практически идентично (в условиях невесомости процесс обтекания происходит медленнее), что видно на рисунках 4-5.



Рисунок 2. Изменение формы капли при обтекании нити в интервале от $t_0 = 0$ до $t_1 = 73$ мс через равные промежутки времени в условиях невесомости (g = 0 м/c², $v_i = 0.1$ м/c, $d_i = 4$ мм, $d_t = 0.2$ мм)



Рисунок 3. Изменение формы капли при обтекании нити в интервале от $t_0 = 0$ до $t_1 = 60$ мс через равные промежутки времени при нормальном ускорении силы тяжести Земли



Рисунок 4. Изменение формы капли при обтекании нити в интервале от $t_0 = 0$ до $t_1 = 11$ мс через равные промежутки времени в условиях невесомости (g = 0 м/c², $v_i = 1$ м/с, $d_i = 4$ мм, $d_t = 0.2$ мм)



Рисунок 5. Изменение формы капли при обтекании нити в интервале от $t_0 = 0$ до $t_1 = 8.5$ мс через равные промежутки времени при нормальном ускорении силы тяжести Земли $(g = 9.81 \text{ м/c}^2, v_i = 1 \text{ м/c}, d_i = 4 \text{ мм}, d_t = 0.2 \text{ мм})$

4.Выводы.

Показано, что величина силы тяжести Земли при больших скоростях капли ($v_i < 1$ м/с) практически не влияет на режим обтекания тонкой нити и существенно может влиять при небольших скоростях капли ($v_i < 1$ м/с).

В невесомости нить диаметром $d_t = 0.2$ мм способна за счёт сил поверхностного натяжения капли задерживать проникновение капли воды диаметром $d_i = 4$ мм, движущуюся со скоростью $v_i = 0.1$ м/с.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ № 23-19-00451.

Литература/References:

1. Rozhkov A., Prunet-Foch B., and Vignes-Adler M., Dynamics of a Liquid Lamella Resulting from the Impact of a Water Drop on a Small Target. Proceedings of The Royal Society. London. Series A. Vol. 460, pp. 2681–2704, 2004.

2. Рожков А.Н., Prunet-Foch B., Vignes-Adler M. Разрушение капель воды при столкновении с дископодобным препятствием. Материалы XXII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2021), 4 - 13 сентября 2021г., Алушта. Изд-во МАИ, Москва, 2021, с.439-441.

3. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. The Study of a Drop Collision with an Obstacle. Advanced Hydrodynamics Problems in Earth Sciences. Earth and Environmental Sciences Springer Nature (Switzerland), pp. 21 - 42. 2023. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-23050-9 3.

4. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Fedyushkin A., Vignes-Adler M. Fragmentation of water drops in collision with a small obstacle. Atomization and Sprays. Vol. 33, no. 10, pp. 1–15. 2023.

5. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. Criterion of drop fragmentation at a collision with a solid target (numerical simulation and experiment). Journal of Physics: Conference Series, vol. 2057, no. 1. 012129. 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012129.

6. Федюшкин А.И., Гневушев А.А., Захаров А.С., Рожков А.Н. Режимы обтекания жидкой каплей твердых препятствий. Материалы XXIII Международной конференции по Вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023), 4 - 10 сентября 2023 г, Дивноморское, Краснодарский край. – М: Изд-во МАИ, с. 440–443. 2023. http://cmmass.ru/files/cmmass2023 web.pdf.

7. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N., Rudenko A.O. Collision of water drops with a thin cylinder. Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2057, no. 1. 012034. 2021.DOI: 10.1088/1742-6596/2057/1/012034.

8. Федюшкин А.И., Рожков А.Н., Руденко А.О., Гневушев А.А., Пунтус А.А. Режимы течения капли через отверстие. Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (AMMAI'2022), 4-13 сентября 2022 г., Алушта, – М: Изд-во МАИ, с. 101-103. 2022.

9. Федюшкин А.И. Обтекание каплей воды пакета тонких колец. Материалы XIV Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (AMMAI-2022), 4-13 сентября 2022 г., Алушта, Москва, 2022, с. 98-100. 2022.

10. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N. Numerical simulation of a drop collision with an obstacle // Процессы в геосредах. Изд-во ООО "Кватернион". Т. 33, № 3, Москва, 2022, с. 1692 – 1703.

11. Федюшкин А.И., Рожков А.Н. Моделирование коалесценции капель. Математическое моделирование и численные методы. Т. 26, № 2, с. 46–58. 2020.

НОВАЯ ВОЗРАСТНАЯ МОДЕЛЬ НА ОСНОВЕ АКТИВНОСТИ ИЗБЫТОЧНОГО 210PB, УЧИТЫВАЮЩАЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКИЙ СОСТАВ ДОННЫХ ОСАДКОВ Р.А. Лукманов¹, В.Ю. Русаков¹, А.С. Савин^{1,2}

¹ФГБУН Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского РАН, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», Москва, Россия

ruluair@gmail.com

1.Введение.

Достоверную информацию об истории осадконакопления за последние десятилетия можно получить по активности короткоживущих радионуклидов, таких как ²¹⁰Pb и ¹³⁷Cs. Наиболее часто используемая радиохронологическая модель основана на активности природного неравновесного или избыточного ²¹⁰Pb [1]. В случае непрерывности осадконакопления и однородности состава осадков, активность избыточного ²¹⁰Pb уменьшается вдоль керна осадка по экспоненциальной

кривой в соответствии с законом радиоактивного распада, который описывается следующим уравнением [2]:

 $N = N_0 e^{-\lambda t}$ (1)

где N – количество радиоактивных атомов, оставшихся за время распада t от первоначального количества радиоактивных атомов N_0 , λ – постоянная распада (для ²¹⁰Pb составляет 0,03122, рассчитано по [3].

2.Материалы и методы.

Отбор осадков происходил на акватории моря Лаптевых на разных станциях, расположенных таким образом, чтобы максимально охватить основные гидрологические, геологические, литологические и геофизические провинции моря [4], с помощью коробчатого пробоотборника и мультикорера, которые позволяют сохранить верхний слой ненарушенным, в отличие от схожего отбора с помощью дночерпателя.

Задача датирования колонки осадков сводится к определению количества атомов N_0 на каждой глубине ($N_0(h)$), решение уравнения (1) относительно *t* представляет собой время залегания каждого слоя:

$$N(h,t) = N_0(h)e^{-\lambda t(h)} \to e^{-\lambda t(h)} = \frac{N(h,t)}{N_0(h)} \to t(h) = -\frac{1}{\lambda} ln \left[\frac{N(h,t)}{N_0(h)} \right]$$
(2)

Обычно за первоначальное количество атомов каждого слоя принимают сколько на верхнем слое, имеющем минимальное время *t*, считаемое за ноль. Тем не менее, такой подход не отражает изменений по глубине, связанных с различием состава.

Предположим, что первоначальное количество радиоизотопа ²¹⁰Pb, содержащегося в каждой фракции образца (пелита, алеврита и песка), линейно зависит от её массы с точностью до размерного коэффициента k, который можно определить как сорбционную ёмкость каждой фракции. Кроме того, считаем, что гранулометрический состав не меняется со временем в каждом конкретном слое. Тогда, на глубине h первоначальное количество избыточного свинца в образце массой $m(h) = m_{cl}(h) + m_{st}(h) + m_{sd}(h)$ определяется как $N_0(h, 0) = k_{cl}m_{cl}(h) + k_{st}m_{st}(h) + k_{sd}m_{sd}(h)$, а современное количество радиоактивных атомов, после t(h) лет с момента залегания определяется законом радиоактивного распада:

 $N(h,t) = (k_{cl}m_{cl}(h) + k_{st}m_{st}(h) + k_{sd}m_{sd}(h))e^{-\lambda t(h)}$ (3)

Откуда можно найти возраст образца, взятого с глубины h, по формуле (2).

Учтём, что активность радионуклида – количество распадов в единицу времени, т.е. $A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \lambda N(t)$, и перепишем уравнение (1) и (3), предварительно разделив левую и правые части на m(h):

$$\frac{A(h,t)}{m(h)} = \left(\lambda k_{cl} \frac{m_{cl}(h)}{m(h)} + \lambda k_{st} \frac{m_{st}(h)}{m(h)} + \lambda k_{sd} \frac{m_{sd}(h)}{m(h)}\right) e^{-\lambda t(h)}$$

Где
$$\frac{A(h,t)}{m(h)} = A'(h,t)$$
 – как раз удельная активность образца на глубине h , $\lambda k_i = k'_i$ –

приведённые коэффициенты *i*-ой фракции, $\frac{m_i(n)}{m(h)} = m'_i$ – массовые доли *i*-ой фракции, далее для простоты использовать штрихи не будем, оставив определения.

Таким образом, устанавливается взаимно-однозначная связь между возрастом образца t и его глубиной h при известных коэффициентах k_{cl} , k_{st} , k_{sd} . Определение этих коэффициентов возможно лишь при наличии не менее трёх колонок, ибо с одним мы имеем систему из n уравнений (где n – количество горизонтов) и n+3 неизвестных k_{cl} , k_{st} , k_{sd} , t_1 , t_2 , ..., t_n . При наличии r колонок ($r \ge 3$), взятых в районах с сопоставимыми условиями седиментации, для образцов из верхнего слоя время t = 0. Таким образом, имеем систему из r линейных алгебраических уравнений для определения трех неизвестных коэффициентов k_{cl} , k_{st} , k_{sd} . При r>3, система будет переопределена.

Образуем матрицу системы M (размером rx3), столбец правых частей A (размером rx1), также запишем столбец неизвестных K (размером 3x1):

$$M = \begin{pmatrix} m_{cl}^1 & m_{st}^1 & m_{sd}^1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ m_{cl}^r & m_{st}^r & m_{sd}^r \end{pmatrix}, \qquad A = \begin{pmatrix} a^1 \\ \vdots \\ a^r \end{pmatrix}, \qquad K = \begin{pmatrix} k_{cl} \\ k_{st} \\ k_{sd} \end{pmatrix} \implies MK = A$$

Для решения переопределённой системы воспользуемся методом наименьших квадратов [5-7]. Минимизация евклидовой нормы разности левой и правой частей рассматриваемой системы линейных алгебраических уравнений приводит к системе трех уравнений для трех неизвестных коэффициентов. $M^T M K = M^T A$, где M^T – транспонированная матрица M. Отсюда искомый столбец неизвестных определяется как

$$K = (M^T M)^{-1} M^T A \qquad (4)$$

Теперь, зная коэффициенты для каждой фракции, можно записать окончательную формулу определения времени *t*, прошедшего с залегания образца на глубине *h*:

$$t(h) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \left(\frac{N(h,t)}{k_{cl}m_{cl}(h) + k_{st}m_{st}(h) + k_{sd}m_{sd}(h)} \right)$$

Можно использовать нормировку на верхний слой для каждого керна. С учётом этого, окончательная формула расчёта времени *t*, прошедшего с залегания образца на глубине *h* примет вид:

$$t(h) = -\frac{1}{\lambda} \cdot \frac{N(h,t)}{N(0)} \cdot \left(\frac{k_{cl}m_{cl}(0) + k_{st}m_{st}(0) + k_{sd}m_{sd}(0)}{k_{cl}m_{cl}(h) + k_{st}m_{st}(h) + k_{sd}m_{sd}(h)}\right)$$
(5)

3. Результаты исследования и их обсуждение.

Нами были рассчитаны коэффициенты сорбционной ёмкости для каждой фракции на основе десяти колонок донных осадков: $k_{cl} = 4,068$ (65,03%), $k_{st} = 1,3379$ (21,38%) и $k_{sd} = 0,8502$ (13,59%). Важно отметить, что эти коэффициенты могут значительно отличаться в разных регионах Мирового океана. Наибольшую сорбционную способность имеют терригенные обломочные отложения, в то время как биогенные карбонатные отложения, наоборот, обладают наименьшей активностью ²¹⁰Pb [8-9]. Также наблюдаются различия в сорбционной способности отложений шельфа. Например, наши коэффициенты для моря Лаптевых отличаются, пусть и незначительно, от соответствующих отношений активностей разных гранулометрических фракций для континентального шельфа штата Вашингтон [10]. Это подтверждает необходимость индивидуального расчета коэффициентов сорбционной ёмкости для каждого исследуемого района, учитывая различную сорбционную способность отложений разного состава.

Используя описанную выше математическую модель, было разработано программное обеспечение для пересчёта возраста под названием RUS2023 [11], доступное для свободного использования (http://www.geokhi.ru/DocLevML или для загрузки архива с программой и руководством http://www.geokhi.ru/DocLevML/Rus2023_v2.zip). Главной целью создания модели RUS2023 было устранение влияния гранулометрического состава осадков на возрастную кривую, вычисленную на основе изменения активности избыточного ²¹⁰Pb.

4.Выводы.

Новая модель возрастной глубины RUS2023, основанная на активности избыточного ²¹⁰Pb, позволила установить средние коэффициенты сорбционной емкости для отложений, расположенных на исследуемой территории, и нивелировать влияние гранулометрического состава. Результаты моделирования выявили отдельные аномальные горизонты в кернах отложений, связанные с нестабильностью потока ²¹⁰Pb в донные осадки.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках госзадания ГЕОХИ РАН и при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ), грант № 23-27-00010.

Литература/References:

1. Goldberg E.D., Bruland K., 1974. Radioactive geochronologies. In: Goldberg E.D. (Ed.), The Sea, vol. 5. Wiley Interscience, New York, pp. 451–489.

2. Faure G., 1986. Principles of isotope geology. 2nd ed. Wiley, New York.

3. Wang M., Audi G., Kondev F.G., Huang W.J., Naimi S., Xu X., 2017. The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties. The Ame2016 atomic mass evaluation (I). Evaluation of input data; and adjustment procedures. Chinese Physics C. Vol. 41, No. 3, pp. 030002-1—030002-344.

4. Lukmanov R.A., Rusakov V.Y., Kuz'mina T.G., Romashova T.V., Kol'tsova A.V., 2023 in press. Geochemical Provinces of Surface Sediments in the Laptev Sea, In: Kolotov, V.P., Bezaeva, N.S. (Eds.), Advances in Geochemistry and Analytical Chemistry – Special Publication to 75th Anniversary of Vernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences. Springer.

5. Лоусон Ч., Хенсон Р., Численное решение задач метода наименьших квадратов/Пер. с англ., М. "Наука", 1986, 232 с.

6. Anton H., Rorres C (2018). Elementary Linear Algebra (12th ed.). John Wiley and Sons, Inc.

7. Kariya T., Kurata H. (2004). Generalized Least Squares. Hoboken: Wiley.

8. Legeleux F., Reyss J.-L., Etcheber H., Khripounoff A., 1996. Fluxes and balance of 210Pb in the tropical northeast Atlantic. Deep Sea Res. I 43(8), 1321-1341.

9. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. Теория и практика. 2-е изд. - Москва: БИНОМ. ЛЗ, 2015. - 289 с.

10. Nittrouer C.A., Sternberg R.W., Carpenter R., Bennett J.T., 1979. The use of Pb-210 geochronology as a sedimentological tool: Application to the Washington continental shelf. Marine Geology 31(3–4), 297-316.

11. Rusakov V.Y., Lukmanov R.A., 2023. Certificate of state registration of the computer program "RUS2023" No. 2023663094, 29 July 2023, copyright holder GEOKHI.

О СВЯЗИ ТОНКОСТРУКТУРНОГО РАССЛОЕНИЯ СТРАТИФИЦИРОВАННОЙ ВОДНОЙ СРЕДЫ С ВЕРТИКАЛЬНЫМ ТУРБУЛЕНТНЫМ МАССООБМЕНОМ В.В. Герасимов, А.Г. Зацепин

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, Россия

<u>zatsepin@ocean.ru</u>

В турбулентном течении стратифицированной жидкости со сдвигом скорости вертикальный поток массы Q обычно представляют в виде:

$$Q = K(d\rho/dz) (1)$$

где К – коэффициент вертикального турбулентного обмена, который не является константой, а зависит от числа Ричардсона. Поскольку стратификация подавляет турбулентность можно допустить, что К есть убывающая степенная функция Ri:

$$K \sim CRi^{-n}$$
, где $n \ge 0$ (2)

Если n > 1, то из (1) - (2), следует, что поток массы Q является убывающей функцией градиента плотности dp/dz.

Это означает, что если где-то в потоке градиент плотности локально увеличился, то поток массы через эту область – уменьшился, в результате чего градиент вырос еще больше.

Данная ситуация неустойчива: малое отклонение от равновесия приводит к дальнейшему росту отклонения. При этом поток стремится разбиться на однородные турбулентные слои, разделенные резкими ступеньками с большим градиентом плотности, через которые обмен затруднен [1, 2].

При n < 1 неустойчивость отсутствует, локальные неоднородности градиента рассасываются, так как поток массы Q является возрастающей функцией dp/dz.

С целью экспериментальной проверки данной модели тонкоструктурного расслоения стратифицированной водной среды были проведены опыты с однородным по вертикали перемешиванием колеблющимися вертикальными стержнями изначально линейного вертикального градиента солености: $(\partial S/\partial z)_0$, который изменялся по величине от опыта к опыту. В ходе опыта микродатчиком электропроводности регулярно измерялись профили солености S(z) и, по изменению солености в приповерхностном слое со временем, рассчитывался средний по вертикали по вертикали поток соли Q_s , который рассматривался в зависимости от числа Ричардсона, Ri =

 $(g/\rho)(\partial \rho/\partial z)d^2/u^2$, где $\partial \rho/\partial z = \beta \partial S/\partial z$ – текущий градиент плотности по вертикали, $(g/\rho)d^2/u^2 = \text{const}$, g - ускорение свободного падения, ρ – плотность воды, β – коэффициент соленостного сжатия, d – диаметр стержней, u – их скорость, средняя по периоду колебания (рисунок 1).



Рисунок 1. Профили солености: начальный (квазилинейный), два последующих - ступенчатые и квазилинейный – на завершающей стадии опыта

В опытах с тонкоструктурным ступенчатым расслоением водной среды (наблюдавшемся при большом начальном градиенте солености) обнаружен различный характер поведения вертикального потока солености (массы) в зависимости от текущего значения числа Ричардсона – вертикального градиента плотности (солености).



Рисунок 2. Зависимость логарифма потока массы от логарифма градиента плотности (переменная составляющая числа Ri) с аппроксимирующими линиями, характеризующими различные этапы эволюции тонкой структуры. k = n-1 – коэффициент аппроксимирующей прямой

На рисунке 2 приведены экспериментальные точки и аппроксимирующие линии зависимости логарифма потока солености от логарифма градиента плотности для этапов образования, эволюции и разрушения тонкой структуры: первый этап – образование устойчивых во времени слоев - поток растет с уменьшением градиента; второй этап – слои разрушаются при убывании потока с уменьшением градиента; третий этап – слои разрушились (опять квазилинейная стратификация), поток практически не зависит от градиента.

Результаты опытов в целом подтвердили механизм тонкоструктурного расслоения изначально линейно стратифицированой водной среды при однородном по вертикали турбулентном перемешивании, предложенный в [1, 2].

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена по теме госзадания FMWE-2021-0002.

Литература/References:

1. Phillips, O.M. Turbulence in a strongly stratified fluid: Is it unstable? In Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 1972; Volume 19, pp. 7–81.

2. Posmentier, E.S. The generation of salinity fine structure by vertical diffusion. J. Phys. Oceanogr. 1977, 7, 298–300.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ ЯПОНСКОГО МОРЯ

С.Ю. Касьянов

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, Россия skas53@yandex.ru

В докладе обсуждается возможность оценки радиальной и азимутальной компонент скорости на верхней границе выхода горячего интенсивного внутримантийного вихря под Японским морем [1] на основе данных о рельефе литосферы. Рассматривается модельная задача о нахождении стационарного осесимметричного течения идеальной жидкости на горизонтальной верхней границе цилиндрической области при постоянном во времени давлении, распределение которого задается модельным рельефом литосферы. Модельный осесимметричный рельеф строится на основе данных о реальном рельефе литосферы области Японского моря с учетом его основных особенностей.

Рассматриваются уравнения движения указанной модельной задачи. С учетом предложенного ранее в [1] механизма образования вихря при заглублении глиссирующего спутника находится стационарное осесимметричное решение уравнений движения, описывающее антициклоническую циркуляцию во внутримантийном вихре, резко разделяющуюся на относительно медленную периферическую часть и «глаз» вихря с быстрым вращением на его границе.

На границе глаза вихря может наблюдаться неустойчивость. В природе, с учетом неидеальности вещества вихря, на границе глаза вихря должно происходить интенсивное вихреобразование с диссипацией кинетической энергии в тепло. Последнее приводит к появлению на границе глаза вихря локальных зон интенсивного выделения эндогенного тепла со дна в воду (преимущественно в виде горячих источников), которые могут оказывать влияние на циркуляцию морских вод.

Литература/References:

1. Kasyanov, S.Y. 2021. Formation of System of Intense Vortices in the Mantle When a Large Temporary Earth Satellite is Immersed. In: Chaplina, T. (eds) Processes in GeoMedia—Volume III. Springer Geology. Springer, Cham. pp 217–232. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3 21.

О ВОЛНОВОЙ ДИНАМИКЕ В ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ

В.К. Казанков¹, С.И. Перегудин², С.Е. Холодова¹

¹Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия ²Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия

v.kazankov98@gmail.com

Математическое моделирование крупномасштабных динамических процессов в электропроводящей идеальной жидкости базируется на ряде работ, описывающих исследуемый динамический процесс в приближении быстрого вращения. В рамках допустимого приближения уравнения движения в должной степени не учитывают эффекты инерции. Как следствие этого, инерциальные волны, а именно, волны Россби и волны Альфвена могут быть отфильтрованы из исследуемой модели. Более того, в предельном случае быстрого вращения скорость может быть определена с точностью до слагаемого, характеризующего геострофическую скорость. Данное обстоятельство обусловлено факторами, в которых геострофическая скорость может не удовлетворять магнитострофическому уравнению. Для разрешения возможных вычислительных сложностей можно использовать, с одной стороны, искусственное привлечение вязких сил, с другой стороны, пренебрежение вязкостью, в случаях, когда это допустимо без упрощения в рамках исследуемой модели.

В предыдущих работах исследовалась задача в магнитострофическом приближении о крупномасштабном движении электропроводящей жидкости в слое между двумя плоскостями при условии наличия вязких сил. В проведенном исследовании допускается предположение о том, что границы слоя не являются плоскими и недеформируемыми, а представляют собой поверхности, изменяющиеся в пространстве и во времени. В рамках данного предположения возможно представление решения полной исходной системы магнитогидродинамических уравнений, при этом в уравнениях движения могут быть учтены силы инерции, а в уравнениях индукции магнитного поля — диффузионные элементы, имеющие тот же порядок, что и конвективные элементы, то есть, исследуемая задача может быть решена при произвольных значениях магнитного числа Рейнольдса. С помощью введения вспомогательных функций система уравнений в частных производных может быть редуцирована к одному скалярному уравнению, позволяющему представление точного решения с последующим качественным анализом. Результат проведенного качественного анализа позволит сделать вывод о влиянии эффектов диффузии магнитного поля на его генерацию и поддержание в отсутствие динамики внешнего поля.

Результаты проведенного исследования могут быть использованы в астрофизике и геофизике, а именно, при изучении процессов, происходящем в жидком ядре Земли и недрах звезд, а также при рассмотрении процессов самовозбуждения магнитогидродинамического динамо в относительно больших массах жидкого металла и технических устройствах, например, в технологических процессах, использующих напорные камеры реактора на быстрых нейтронах.

Изначально исследуемое физическое явление может быть смоделировано посредством замкнутой системы уравнений в частных производных с соответствующими граничными условиями [1], редуцирование которой к одному скалярному уравнению позволяет произвести качественный анализ с возможностью утверждать, что в случае не вмороженного магнитного поля учтенные граничные эффекты могут способствовать нарушению устойчивости, а следовательно, и росту магнитного поля. Наряду с этим, управляя значениями затравочного магнитного поля, можно наблюдать установившийся во времени процесс, то есть, индуцированное магнитное поле сможет существовать сколь угодное длительное время. При отсутствии влияния внешнего магнитного поля и соответствующего соотношения физических параметров волновой режим может сохраняться, а может и иметь неустойчивый режим.

Литература/References:

1. Холодова С.Е., 2009. Волновые движения в стратифицированной электропроводной вращающейся жидкости. Журнал вычислительной математики и математической физики. 49: 916-922.

ЭФФЕКТЫ КОАЛЕСЦЕНЦИИ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ КАПЕЛЬ ВОДЫ С ТОНКИМ ЦИЛИНДРОМ

А.В. Базилевский, А.Н. Рожков

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия

<u>baz@ipmnet.ru</u>

Столкновение капли жидкости с тонким цилиндром, нитью, волокном – определяющий элемент процессов улавливания капель при защите от патогенных капель с помощью медицинских масок и респираторов, а также в ряде устройств, тормозящих/блокирующих движение капель в различных ситуациях. Визуализация элементарного акта столкновения выполнена в ряде работ [Ошибка! Источник ссылки не найден.–Ошибка! Источник ссылки не найден.], в которых наблюдались различные сценарии взаимодействия капли и тонкого препятствия. Настоящая работа нацелена на выявление незамеченных ранее деталей взаимодействия капли и препятствия. В частности, внимание уделено трансформации капли при отрыве капли от препятствия.

Схема эксперимента показана на рисунке 1. Капля воды формировалась путём медленной подачи воды шприцевым насосом и последующего отрыва капли под действием силы тяжести от инъекционной медицинской иглы с внешним диаметром d_1 =0.64 мм. Диаметр сформировавшейся капли составлял d_i =2.82±0.02 мм. Скорость соударения задавалась путём изменения высоты падения капель h_1 =12.5, 25, 50, 100 и 200 мм и составляла v_i =0.42, 0.65, 0.95, 1.38 и 1.96 м/с. Цилиндрическим препятствием служила инъекционная медицинская игла с внешним диаметром d_i =0.16, 0.34, 0.64 и 1.27 мм, которая располагалась поперек траектории движения капли. Процесс соударения регистрировался при помощи скоростной видеокамеры Phantom VEO710L с частотой записи 10000 кадров/с. Ракурс съёмки выбирался таким образом, чтобы угол α между осями цилиндра и объектива камеры составлял α =0, 45 и 90° (рисунок 1).



Опыты показали, что, как и в работе [1], при низких скоростях капля не в состоянии преодолеть препятствие и остаётся на его поверхности. При более высоких скоростях в ходе столкновения сначала происходит разделение первичной капли на две части. Далее в зависимости от условий удара может происходить либо 1) коалесценция обеих частей в единую финальную каплю, либо 2) окончательное разделение на две изолированные вторичные капли. Наблюдается тенденция к коалесценции и подавлению фрагментации (т.е. случай 1)) в определённом диапазоне скоростей удара. Такое поведение отличается от явного стремления к фрагментации при увеличении скорости в случаях радиального всплеска и соударения капли с небольшим дискообразным препятствием [4, 5]. Не выявлено критического влияния диаметра первичной капли и смачиваемости поверхности препятствия на его обтекание каплей.

Каким же образом капля может обтекать цилиндрическое препятствие? Ответ показан на рис. 2 для одного из частных случаев.

На кадрах t = 3 мс жидкость обволакивает цилиндрическую поверхность препятствия, и формируются два жидких слоя (первичные всплески) с вертикальными цилиндрическими краевыми струями.

На кадрах t = 3.75 мс первичные всплески схлопываются в результате взаимного сближения и соударения цилиндрических краевых струй. Притяжение струй обеспечивается поверхностным натяжением в двух первичных всплесках. Динамика сближения краевых струй аналогична сближению краевых струй стационарного всплеска, формирующегося при истечении жидкости из щелевого насадка [6] – рисунок 3.

На кадрах t = 4.0 мс в результате соударения цилиндрических краевых струй формируются вторичные всплески, лежащие в единой плоскости. Точно также при столкновении цилиндрических краевых струй в стационарном всплеске на рисунке 3 в точке А формируются вторичный всплеск AB, плоскость которого перпендикулярна плоскости первичного всплеска OA и перпендикулярна плоскости кадра.



Рисунок 2. Удар капли воды по цилиндру диаметром d₁=0.64 мм. Вид вдольи поперёк оси цилиндра. Скорость капли v_i=1.38 м/с

На кадрах t = 4.25 мс вторичные всплески касаются друг друга, коалесцируют, формируют единый всплеск, который в конечном счёте заставляет обе вторичные капли слиться в единую вторичную каплю.



Рисунок 3. Стационарный всплеск ОА при истечении воды из щелевого насадка О

В точке А краевые струи сталкиваются и формируют вторичный всплеск AB, перпендикулярный первичному всплеску OA и третичному всплеску BC.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена по теме государственного задания (№ госрегистрации 123021700044-0) и поддержана грантом РНФ № 23-19-00451.

Литература/References:

1. Lorenceau É., Clanet C., Quéré D. Capturing drops with a thin fiber // J. Colloid Interface Sci. 2004. V. 279. P. 192–197.

2. Fedyushkin A.I., Rozhkov A.N., Rudenko A.O. Collision of water drops with a thin cylinder // Journal of Physics: Conference Series. 2021. V. 2057. № 012034.

3. Базилевский А.В., Рожков А.Н. Удар микроструи воды по микроволокну // Изв. РАН. МЖГ. 2023. № 5. С. 110–118.

4. Базилевский А.В., Рожков А.Н. Всплески вязких жидкостей // Материалы XXIII Международной конференции по вычислительной механике и современным прикладным программным системам (ВМСППС'2023), 4–10 сентября 2023 г., Дивноморское, Краснодарский край. — М.: Изд-во МАИ, 2023. 656 с. С. 304–307.

5. Rozhkov A., Prunet-Foch B., Fedyushkin A., Vignes-Adler M. Fragmentation of water drops in collision with a small obstacle // Atomization and Sprays. 2023. V. 33. № 10. P. 1–15.

6. Ентов В.М., Рожков А.Н., Фейзханов У.Ф., Ярин А.Л. О динамике пленок жидкостей. Плоские пленки со свободными ребрами // ПМТФ. 1986. № 1. С. 47–53.

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫНОСА ПЕСКА В ВЕРТИКАЛЬНО И ГОРИЗОНТАЛЬНО НАПРАВЛЕННЫХ СКВАЖИНАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА С ПОМОЩЬЮ УСТАНОВКИ ИСТИННО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ Н.И. Шевцов, В.В. Химуля, С.О. Барков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

<u>red3991@ya.ru</u>

Скважины подземных хранилищ газа (ПХГ) эксплуатируются в циклическом режиме с чередованием процесса закачки и отбора газа. При этом при закачке пластовое давление повышается, а при отборе – понижается. Кроме того, в процессе закачки газа на забое скважины поддерживается репрессия, а при отборе газа – депрессия. Это приводит к изменению напряженного состояния в окрестности скважин и росту касательных напряжений. В результате в призабойной зоне пласта (ПЗП) может начаться разрушение породы и, как следствие, вынос песка в скважину [1,2], что приводит к засорению фильтрационных каналов и последующему снижению дебита, износу бурового оборудования [3,4]. Вынос слишком большого количества песка ослабляет грунтовый скелет и может в конечном итоге вызвать разрушение породы, слагающей призабойную зону пласта [5].

Уникальный экспериментальный стенд Испытательная система трехосного независимого нагружения (ИСТНН), созданный в Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (ИПМех РАН) [6], позволяет напрямую моделировать процесс понижения давления на забое скважин по т.н. схеме «полый цилиндр» на кубических образцах с ребром 40 мм, изготовленных из кернового материала. Однако в силу масштабного эффекта эти эксперименты не позволяют количественно определить величины депрессий, приводящих к разрушению породы в окрестности скважин, но дают возможность увидеть качественную картину деформационных процессов и определить объем и характеристики выносимых частиц породы.

В образцах, предназначенных для испытаний по схеме «полый цилиндр», по центру грани в направлении одной из осей просверливалось отверстие диаметром 10 мм. В ходе эксперимента через канал в наконечнике верхней активной нажимной плиты, совпадающий с отверстием в

образце, продувался воздух под давлением около 0,1 МПа. Для отвода прошедшего через канал в образце газа в наконечнике нижней нажимной плиты также имеется отверстие, совпадающее с каналом в образце. Через это отверстие по специальной трубке выносимый песок поступал на электронные весы, соединенные с компьютером. В ходе эксперимента к граням образца прикладывались равные сжимающие напряжения, которые постепенно увеличивались в ходе опыта. При этом регистрировались деформации образца в трех направлениях и измерялся вес песка, выносимого из образца потоком воздуха. Точность электронных весов составляет 0,001 г, а запись осуществлялась через каждые 2 с. Испытание образца продолжалось до его разрушения. Нагружение образца носило ступенчатый характер. На каждой ступеньке напряжения по всем трем осям, равномерно увеличивались на 1 МПа, после чего следовала выдержка по времени до прекращения выноса песка.

В данной работе представлены результаты серии экспериментов, проведенных на образцах, изготовленных из кернового материала Удмуртского резервирующего комплекса ПХГ. Было испытанно три образца, все три были изготовлены из одного куска керна. В образцах В1 и В3 отверстие было просверлено вдоль оси керна (качественно соответствует вертикальной скважине), в образце В2 – вдоль напластования (качественно соответствует горизонтальной скважине).



Рисунок 1. Зависимость массы вынесенного песка от сжимающих напряжений и кривые деформирования для образцов B2 (a) и B3 (б)

Из приведенных на рисунке 1 графиков можно заметить, что вынос песка при моделировании горизонтальной скважины (образец В2, отверстие в образце вдоль напластования) начался при напряжениях около 20 МПа, а разрушение образца произошло при 47 МПа, в то время как при моделировании вертикальной скважины (образец В3) заметный вынос начался при

значениях напряжений около 43 МПа, а разрушение наступило только по достижении 55 МПа. В ходе испытания образца В2 общая масса вынесенного песка составила примерно 1,1 г, для образца В3 это значение (около 0,5 г) меньше примерно в два раза.



Рисунок 1. Фото образцов В2 (а) и В3 (б) после испытаний

На рисунке 2 приведены фотографии образцов после испытаний. Нетрудно увидеть, что разрушение отверстия у образца В2, началось в точках, отвечающих верхней и нижней точкам контура горизонтальной скважины в пласте, и затем продолжилось в этом же направлении, образуя характерный для скважин вывал [7]. Разрушение образца В3 произошло симметрично по всему контуру отверстия. Это согласуется с тем, что отверстие просверлено перпендикулярно плоскостям напластования, в которых прочностные свойства породы изотропны.

Полученные на установке ИСТНН результаты моделирования образцов Удмуртского резервирующего комплекса ПХГ по схеме «полый цилиндр» позволяют сделать вывод о наличии прочностной анизотропии пород-коллекторов данного ПХГ. Моделирование создания депрессии в горизонтально направленных скважинах показало более раннее разрушение стенок и вынос большего количества песка по сравнению с аналогичным моделированием для вертикально направленных скважин.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 123021700046-4.

Литература/References:

1. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Сидорин Ю.В., Устинов К.Б. Геомеханическое моделирование процессов в призабойной зоне скважины // Мониторинг. Наука и технологии. 2016. № 3. с. 85-91.

2. Мирзаджанзаде А.Х. Основы технологии добычи газа. – М.: Недра, 2003. – 880 с.

3. Аксенова Н.А. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами: монография / Н. А. Аксенова, В. П. Овчинников, А. Е. Анашкина. – Тюмень: ТИУ, 2018. – 134 с.

4. Arman Salahi, Ali Naghi Dehghan, Seyed Jamal Sheikhzakariaee, Afshin Davarpanah, Sand production control mechanisms during oil well production and construction, Petroleum Research, Volume 6, Issue 4, 2021, Pages 361-367.

5. Порошин М.А., Тананыхин Д.С., Григорьев М.Б. Fнализ лабораторных методов исследования процесса пескопроявления при разработке нефтяных месторождений // Вестник евразийской науки. 2020.

6. Karev V.I., Kovalenko Yu.F. Triaxial loading system as a tool for solving geotechnical problems of oil and gas production. В сборнике: True Triaxial Testing of Rocks Cep. "Geomechanics Research Series" Leiden, 2013. С. 301-310.

7. Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Карев В.И. Геомеханический анализ образования вывалов на стенках скважин // в журнале Известия Российской академии наук. Механика твердого тела, 2022.

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ГЕРМЕТИЗИРУЮЩЕЙ ОБОЛОЧКИ И СПОСОБА КРЕПЛЕНИЯ LVDT-ДАТЧИКОВ НА ИЗМЕРЕНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НА УСТАНОВКЕ ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ ГТ1.3.9 С.О. Барков, Н.И. Шевцов, В.В. Химуля

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

sviatoy97@gmail.com

В лаборатории геомеханики ИПМех РАН для определения упругих и прочностных характеристик горных пород помимо установки истинно трехосного нагружения уникальной Испытательной системы трехосного независимого нагружения (ИСТНН) [1] применяется экспериментальная установка псевдо-трехосного осесимметричного сжатия ГТ1.3.9, в основу которой заложен принцип Кармана. В настоящее время установки трехосного осесимметричного сжатия активно применяются по всему миру [2, 3]. Главным достоинством данной установки является возможность создания в образцах в ходе испытаний термобарических условий, соответствующих пластовым, в том числе порового давления. Однако при проведении испытаний на установке ГТ1.3.9 возникает ряд проблем. Работа посвящена изучению ряда таких проблем.

Установка ГТ1.3.9, разработанная и сконструированная ООО НПП «Геотек», позволяет нагружать цилиндрические образцы, диаметр которых составляет 25, 30 и 42 мм, а высота – 50, 60 и 84 мм соответственно. Максимальная вертикальная нагрузка составляет 500 кН и прикладывается независимо от всестороннего обжатия, которое создается в испытательной камере за счет силиконового масла ПМС при помощи внешнего нагнетателя (поршневого насоса с электромеханическим приводом) и может достигать 70 МПа. Вертикальное нагрузочное устройство представляет собой силовую раму с электромеханическим приводом. В корпус камеры встроен нагревательный элемент, позволяющий управлять температурой в диапазоне от +25 до +110 °С. Для создания в образце порового давления и проведения фильтрационных испытаний дополнительно применяются два внешних нагнетателя с максимальным давлением 40 МПа, заполняемые водой. Фото установки ГТ1.3.9 представляены на рисунке 1.



Рисунок 1. а – установка трехосного сжатия ГТ1.3.9, б – система внешних нагнетателей установки ГТ1.3.9

Измерение локальных продольных и поперечных деформаций образца во время испытания осуществляется при помощи LVDT-датчиков линейных перемещений. При этом для корректного

измерения продольной деформации рассчитывается среднее значение по двум датчикам, прикрепляемых к боковой поверхности образца напротив друг друга.

Использование двух датчиков необходимо для учета продольного изгиба, который может возникнуть в результате несоосного приложения нагрузки или малейшей кривизны торцов образца. Для измерения поперечных деформаций образца LVDT-датчик устанавливается на роликовую цепь, которая крепится к середине образца. В конструкции цепи предусмотрено магнитное крепление, которое предотвращает повреждение цепи при сильной деформации образца. При исследовании слабосцементированных пород и проведении фильтрационных испытаний образец дополнительно помещается в эластичную оболочку, которая предотвращает попадание продуктов разрушения в камеру и обеспечивает герметичность. Монтаж датчиков в таком случае осуществляется поверх оболочки. Фото образца в различных оболочках с установленными датчиками представлены на рисунке 2.



Рисунок 2. а – образец с установленными датчиками деформаций в полиолефиновой оболочке, б – образец с установленными датчиками деформаций в полиуретановой оболочке

Следует отметить, что наличие оболочки может вносить существенные погрешности в измерение деформаций испытуемого образца и определение его упруго-прочностных свойств соответственно. Герметизирующие оболочки могут быть изготовлены из различных материалов и соответственно оказывать различное влияние на измерение деформаций образца. На точность определения деформаций влияет и способ крепления датчиков к поверхности оболочки образца. Таким образом важным является проведение исследований, направленных на подбор оптимального типа оболочки и способа крепления датчиков деформаций к образцу.

В данной работе представлены результаты серии экспериментов по отработке методики проведения трехосных испытаний на установке ГТ1.3.9, в рамках которой осуществлён подбор оптимального типа герметизирующей оболочки и способа крепления к образцу LVDT-датчиков. Испытания проводились на модельном цилиндрическом образце из бетона с диаметром 42 мм и высотой 84 мм. на рисунке 3(а) представлены кривые деформирования образца для этапа всестороннего сжатия образца до 2МПа, а на рисунке 3(б) – для этапа увеличения девиаторной нагрузки и ее снятия при обжатии 10 МПа.

Видно, что оболочка оказывает наибольшее влияние на измерение радиальной деформации образца, а использование цепи с конструкцией без магнитного крепления, позволяет снизить данное влияние. При этом чем толще оболочка, тем существеннее ее вклад в деформацию. В случае проведения испытаний без фильтрации высокопрочных пород эффективнее не использовать оболочку, в противном случае оптимальным вариантом будет оболочка из

полиолефина, так как в полиуретановых и латексных оболочках при нагрузке наблюдается нарушение герметичности.



Рисунок 3. Сравнение кривых деформирования образца при использовании различных оболочек и способов крепления датчиков на разных этапах трехосного испытания: а – всестороннее сжатие до 2 МПа, б – увеличение девиаторной нагрузки и ее снятие при обжатии 10 МПа

Следует отметит, что в подобных установках довольно часто используют резиновые оболочки [4], однако толщина таких оболочек составляет более 1 мм, что значительно превышает толщину полиолефиновых оболочек (менее 0,5 мм) и вносит более существенный вклад в измерение деформаций. При использовании толстостенных резиновых оболочек необходимо проведение дополнительных исследований, направленных на расчет деформаций оболочки при нагрузке [5]. К тому же изготовление резиновых оболочек требует больших финансовых затрат. Наиболее точное измерение вертикальных деформаций обеспечивается острыми креплениями вертикальных датчиков, которые предотвращают проскальзывание по поверхности образца. Использование острых креплений увеличивает точность определения продольной деформации образца на 10-15%, что особенно заметно при испытаниях высокопрочных пород. При этом проведение фильтрационных испытаний невозможно с применением острых креплений из-за нарушения герметичности оболочки. Следует отметить, что эксперименты, проведенные слабосцементированных низкопрочных породах, не продемонстрировали существенной разницы в продольных деформациях образца, измеренных с использованием острых и обычных креплений для вертикальных датчиков. В таком случае даже обычные крепления обеспечивают надежную фиксацию датчиков к поверхности образца.

Таким образом для наиболее точного определения деформаций образца испытания сильносцементированных высокопрочных пород необходимо проводить без герметизирующей оболочки с использованием острых креплений для вертикальных датчиков. При этом при низких нагрузках, не приводящих к большим деформациям и возможному последующему разрушению образца, для более точного измерения радиальной деформации необходимо использовать цепь без магнитного крепления. При испытаниях низкопрочных слабосцементированных пород, а также при проведении фильтрационных испытаний, необходимо использовать полиолефиновую герметизирующую оболочку, обычные крепления для вертикальных датчиков и цепь с магнитным креплением. В случае фильтрационных испытаний, не приводящих к большим деформациям

образца, необходимо использовать цепь без магнитного крепления и вычесть деформацию оболочки из измеренной радиальной деформации образца, поскольку наибольшую погрешность в измерение радиальной деформации оболочка вносит именно в начале нагружения. Для этого требуется проведение дополнительных экспериментов по определению деформаций оболочки. Также следует отметить, что чем больше деформации образца, тем меньшую погрешность измерений обеспечивают LVDT –датчики.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер госрегистрации 123021700046-4.

Литература/References:

1. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of oil and gas wells. Advances in oil and gas exploration and production. Springer International Publishing Cham: Switzerland, 2020. 166 p.

2. Waranga Habaraduwa Peellage, Behzad Fatahi, Haleh Rasekh. Assessment of cyclic deformation and critical stress amplitude of jointed rocks via cyclic triaxial testing // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Vol. 15, Issue 6, 2023, P. 1370-1390.

3. Hou, P.Y., Cai, M., Zhang, X.W., et al. Post-peak Stress–Strain Curves of Brittle Rocks Under Axialand Lateral-Strain-Controlled Loadings // Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 55, 2022, P. 855– 884.

4. Ren G.M., Wu H., Fang Q., Liu J.Z., Gong Z.M. Triaxial compressive behavior of UHPCC and applications in the projectile impact analyses // Construction and Building Materials, Vol. 113, 2016, P. 1-14.

5. Raghunandan, M.E., Sharma, J.S. & Pradhan, B. A review on the effect of rubber membrane in triaxial tests // Arab J Geosci, Vol. 8, 2015, P. 3195–3206.

РЕАЛИЗАЦИЯ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЙ В ЭФФЕКТИВНЫХ И ПОЛНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА УСТАНОВКЕ ТРЕХОСНОГО ОСЕСИММЕТРИЧНОГО СЖАТИЯ ГТ1.3.9

С.О. Барков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, Москва, Россия

sviatoy97@gmail.com

Для определения упруго-прочностных характеристик и построения паспорта прочности горных пород по критерию Кулона-Мора в лаборатории геомеханики ИПМех РАН при помощи уникальной Испытательной системы истинно трехосного независимого нагружения ИСТНН [1] проводят классические трехосные испытания. Установка ИСТНН позволяет нагружать кубические образцы породы с гранью 40 или 50 мм независимо по каждой из трех осей. В связи с конструктивными особенностями данной установки провести прямое физическое моделирование геомеханических процессов в пластовых (термобарических) условия не представляется возможным. Поэтому построение программ нагружения и непосредственно испытания образцов производятся в эффективных (скелетных) напряжениях. В связи с этим для обоснования правомерности такой постановки опытов на имеющейся в ИПМех РАН установке трехосного осесимметричного сжатия (установки Кармановского типа) ГТ1.3.9, позволяющей проводить испытания цилиндрических образцов горных пород как при наличии, так и при отсутствии порового давления [2, 3], было выполнено моделирование первого цикла трехосных испытаний в эффективных и полных напряжениях на одном и том же образце.

Установка ГТ1.3.9, позволяет нагружать цилиндрические образцы, диаметр которых составляет 25, 30 и 42 мм, а высота – 50, 60 и 84 мм соответственно. Максимальная вертикальная нагрузка составляет 500 кН и прикладывается независимо от всестороннего обжатия, которое создается в испытательной камере за счет силиконового масла ПМС при помощи внешнего нагнетателя (поршневого насоса с электромеханическим приводом) и может достигать 70 МПа. В корпус камеры встроен нагревательный элемент, позволяющий управлять температурой в

диапазоне от +25 до +110 °C. Для создания в образце порового давления и проведения фильтрационных испытаний дополнительно применяются два внешних нагнетателя с максимальным давлением 40 МПа, заполняемые водой. Данные нагнетали подключаются к верхнему и нижнему штампу нагружающего узла и соответственно позволяют создавать давление жидкостью у верхней и нижней части образца. На выходе из нагнетателей установлены расходомеры, которые позволяют определять объем вытекающей или втекающей в нагнетатель жидкости. Для обеспечения герметичности испытуемый образец помещается в эластичную полиолефиновую оболочку. Измерение локальных продольных и поперечных деформаций образца во время испытания осуществляется при помощи LVDT-датчиков линейных перемещений, которые устанавливаются поверх оболочки.

Для проведения испытаний В эффективных И полных напряжениях ИЗ слабосцементированного песчаника был изготовлен цилиндр с диаметром 42 мм и высотой 84 мм. Фото образца перед началом испытаний в эффективных и полных напряжениях с установленными на них LVDT-датчиками представлены на рисунке 1. Для сохранения свойств испытуемой породы и возможности проведения на данном образце повторного испытания был выполнен только первый цикл нагружения трехосного испытания. Вначале было проведено испытание в эффективных напряжениях, а затем - в полных. В двух опытах образец в процессе всего нагружения деформировался упруго, не доходя до пластичного состояния.



Рисунок I. а – образец перед испытанием в эффективных напряжениях, б – образец перед испытанием в полных напряжениях с подключенными внешними нагнетателями для создания порового давления

Программы нагружения образца в испытаниях представлены на рисунке 2, где $\sigma_1 = \sigma_3 + \Delta \sigma$ – полное вертикальное напряжение, $\sigma_3 = \sigma_2$ – всестороннее давление, $\Delta \sigma$ – девиаторное напряжение. При испытаниях в полных напряжениях для насыщения образца был создан градиент давления на его торцах. Фильтрация воды через образец осуществлялась до тех пор, пока расход воды, исходящей из одного нагнетателя (нижний), не выровнялся с расходом воды, входящей в другой нагнетатель (верхний).

При испытаниях в эффективных напряжениях на первом этапе нагружения осуществлялось всесторонне сжатие до 5 МПа, а на втором – увеличение девиаторной нагрузки примерно до 26 МПа и ее последующее снятие. При испытаниях в полных напряжениях на первом этапе нагружения осуществлялось всесторонне сжатия до 10 МПа и увеличение порового давления до 5 МПа, при этом нагружение носило ступенчатый характер. На втором этапе нагружения происходило увеличение девиаторной нагрузки примерно до 27 МПа и ее последующее снятие.



образца в полных напряжениях

На рисунке 3 представлены кривые $\sigma - \varepsilon$ для продольной деформации образца в испытаниях, а на рисунке 4 – зависимость модуля *E* от прикладываемой полной вертикальной нагрузки при увеличении девиаторной нагрузки.



Рисунок 3. Кривые σ – ε для продольной деформации образца при: а – испытаниях в эффективных напряжениях, б – испытаних в полных напряжениях



Рисунок 4. Зависимость модуля E от полного вертикального напряжения при: а – испытаниях в эффективных напряжениях, б – испытаних в полных напряжениях

Из приведенных графиков видно, что результаты испытания образца на установке ГТ1.3.9 при наличии и отсутствии порового давления практически совпадают, что говорит о правомерности моделирования на установках трехосного нагружения деформационных процессов, происходящих в пластах нефтегазовых месторождений, на «сухих» образцах по программам, отвечающих действующим в породе эффективным напряжениям.

Данные результаты указывают на правомерность проведения трехосных испытаний в эффективных напряжениях на установке ИСТНН.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках государственного задания, номер госрегистрации 123021700046-4.

Литература/References:

1. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of oil and gas wells. Advances in oil and gas exploration and production. Springer International Publishing Cham: Switzerland, 2020. 166 p.

2. Suits L., Sheahan T., Berre Toralv. Triaxial Testing of Soft Rocks // Geotechnical Testing Journal, 2011, Vol. 34, P. 102879.

3. Bai, J., Diao, Y., Jia, C. et al. A Review of Advances in Triaxial Tests: Instruments, Test Techniques and Prospects // KSCE J Civ Eng, 2022, Vol. 26, P. 3325–3341.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОСТА ТРЕЩИН ПРИ НАГРЕВЕ КЕРОГЕНСОДЕРЖАЩЕГО ПЛАСТА А.Н. Галыбин^{1,2}, С.Е. Якуш¹

¹Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Москва, Россия ²Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, Москва Москва, Россия yakush@ipmnet.ru

Тепловое воздействие на нефтематеринские породы, содержащие твердое углеводородное сырье в виде заключенного в мелких порах керогена, рассматривается как один из перспективных методов разработки таких месторождений, как Баженовская свита [1, 2]. При тепловом воздействии происходит преобразование изначально твердого керогена в синтетическую нефть и газ за счет протекания реакций пиролиза в порах. Однако принципиальной проблемой месторождений Баженовской свиты является отсутствие естественной системы трещин, по которым могла бы осуществляться фильтрация возникающих при пиролизе подвижных флюидов к добывающим скважинам. Это делает неэффективной технологию гидроразрыва пласта, широко применяемую для повышения нефтеотдачи из традиционных коллекторов [2, 3]. Применительно к пластам Баженовской свиты, гидроразрыв пласта может оказаться целесообразным для добычи нативной нефти из имеющихся высокопроницаемых пропластков. Однако для извлечения углеводородов из непроницаемой керогенсодержащей матрицы в ней должна быть искусственно создана связанная система трещин (техногенная трещиноватость).

Процесс преобразования керогена в порах непроницаемой матрицы начинается при прогреве до температур порядка 350°С [3, 4]. Преобразование твердого керогена в синтетическую нефть и газ приводит к резкому возрастанию внутрипорового давления и образованию первичных трещин с длиной порядка нескольких диаметров поры. Эти трещины, однако, недостаточны для возникновения проницаемости породы, поскольку поры в породе расположены достаточно далеко друг от друга. Существенная проницаемость может возникнуть только при слиянии первичных трещин с образованием достаточно длинных трещин, длина которых сравнима с поперечными размерами керогенсодержащего пласта, составляющими для условий Баженовской свиты от 1 до 10 м. Поэтому возникает ключевая задача о распространении и слиянии трещин в зависимости от их взаимного расположения и действующих в пласте напряжений.

В предыдущей работе [5] рассмотрены связанные физико-химические и геомеханические аспекты образования трещин, их роста и слияния. Для решения данной задачи требуется

совместное описание процессов, происходящих в отдельной поре до момента ее раскрытия, стадии неустойчивого и устойчивого роста трещины, взаимодействия трещин от находящихся рядом пор, масштабирования результатов на большие размеры трещин. Было продемонстрировано, что развитие системы трещин приводит к слиянию некоторых из них, что создает предпосылки для возникновения путей фильтрации подвижных флюидов на расстояния, значительно большие, чем средние расстояния между порами. В то же время, расчеты показали, что не во всех случаях распространяющиеся трещины сливаются, возможно образование тупиковых траекторий, не участвующих в процессах фильтрации.

Целью данной работы является продолжение исследований [5] и выяснение влияния существующих в пласте напряжений на процесс распространения и слияния трещин. Рассмотрение проводится в двумерном приближении на основании математической модели, развитой в работе [5]. Для моделирования распространения системы трещин от начальных пор, распределенных по материалу непроницаемой матрицы, используется метод граничных интегральных уравнений [6]. Считается, что распространение конца трещины происходит в локальном направлении наибольшего сжатия, которое зависит как от существующих в пласте внешних напряжений, так и напряжений, создаваемых всеми соседними трещинами. Изменение конфигурации трещин рассчитывается путем выполнения последовательных шагов. На каждом шаге методом граничных интегральных уравнений рассчитывается поле напряжений с учетом текущего расположения трещин друг относительно друга. Далее определяются коэффициенты интенсивности напряжений и раскрытие трещины. В случае, если внутренне давление оказывается новая форма трещины, в противном случае рост трещины останавливается.

В предыдущей работе [5] были проведены расчеты распространения нескольких трещин при регулярном (двоякопериодическом) расположении пор и случайном расположении керогенсодержащих пор. В настоящей работе основное внимание сфокусировано на росте одиночной трещины в породе, где также имеется совокупность соседних трещин, однако эти соседние трещины остаются стационарными. Такой подход позволяет проиллюстрировать основные закономерности роста трещины и ее взаимодействия с соседними трещинами и выделить главные факторы, влияющие на форму траектории трещины. Отметим, что по сравнению с работой [5] численный алгоритм решения сингулярных интегральных уравнений был оптимизирован, что позволило повысить скорость расчета без ухудшения его точности.

Распространение трещины исследовалось в прямоугольной области, при этом считалось, что максимальные внешние сжимающие напряжения $S_{\rm max}$ направлены по горизонтальной оси, минимальные сжимающие напряжения $S_{\rm min}$ – по вертикальной оси. Используются безразмерные переменные, в которых полудлина L начальных трещин равна 1 (в некоторых случаях – 0.5), кроме того, задавалось превышение внутрипорового давления P над $S_{\rm min}$ (в дальнейшем используются относительные единицы, в которых принято $S_{\rm min} = 0$, P = 10 МПа). Стационарные трещины описывались путем введения 16 расчетных узлов, растущая трещина – введением 64 узлов. Расчеты проводились с безразмерным шагом по длине растущей трещины, равным 0.05.

В качестве тестового примера, демонстрирующего работоспособность модифицированного в данной работе вычислительного алгоритма, на рис. 1 представлено распространение средней трещины при наличии двух стационарных трещин, расположенных на одинаковом (а) и разном (б) боковом расстоянии (в расчете принималось $S_{\max} = S_{\min}$). Видно, что несимметричное распределение напряжений в случае б) приводит к тому, что растущая трещина стремится соединиться с ближайшей боковой трещиной.



Рисунок 1. Рост центральной трещины при симметричном (a) и несимметричном (б) расположении двух боковых трещин

Расчеты распространения трещины по системе 10 соседних трещин проводились для двух вариантов размещения, определенных случайным образом. На рисунке 2(а) показана траектория трещины (вариант 1) в случае изотропных напряжений ($S_{max} = S_{min} = 0$), на рисунке 2(б) показана форма трещины в укрупненном масштабе по поперечной координате. Видно, что оба конца трещины слились с соседними трещинами, ближайшими в поперечном направлении. На рисунке 3 аналогичные результаты показаны для сжимающего напряжения $S_{max} = -15$ МПа. Видно, что продольное сжатие делает трещину более прямолинейной, а слияние с соседними трещинами происходит ближе к их дальним концам.

Аналогичные расчеты для варианта 2 расположения трещин представлены на рисунках 4 и 5. В данном случае левый конец растущей трещины сливается с соседней трещиной, правый остается свободным (рисунки 4, 5(а)). При увеличении сжимающего напряжения слияния с соседними трещинами вообще не происходит (рисунки 5(б)).



Рисунок 2. Форма трещины для варианта 1 случайного расположения 10 стационарных трещин, $S_{max} = C_{max}$



Рисунок 4. Форма трещины для варианта 2, $S_{max} = S_{min} = 0$

a

б



Таким образом, в расчетах показан процесс развития и возможного слияния трещины, растущей вследствие поддержания внутреннего давления за счет процессов пиролиза керогена. Показано, что в условиях изотропного сжатия форма трещин может значительно отклоняться от линейной, тогда как при значительном превышении максимального сжимающего напряжения над минимальным трещины распространяются практически линейно.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Министерства науки и высшего образования РФ № 13.1902.21.0018 «Фундаментальные проблемы развития минерально-сырьевой базы высокотехнологичной промышленности и энергетики России», проект 075-15-2020-802.

Литература/References:

1. Афанасьев И.С., Гаврилова Е.В., Бирун Е.М., Калмыков Г.А., Балушкина Н.С., 2010. Баженовская свита. Общий обзор, нерешенные проблемы. НТС ОАО «НК Роснефть», № 4: 20–25, ISSN 2074-2339.

2. Polishchuk A. M., Vlasov S. A. & Yakush S. E., 2018. Current status of oil recovery from Bazhenov formation: Efficiency analysis of existing technologies and new approach. Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer Cham, 395–410.

3. Якуш С. Е., Полищук А. М., 2019. Разработка Баженовской свиты: проблемы и подходы. Процессы в геосредах. Т. 4, № 22, 540–551.

4. Yakush S. E., Galybin A. N., Polishchuk A. M. & Vlasov S. A., 2018 Modeling of thermal gas treatment of low-permeability reservoirs of Bazhenov formation. Physical and Mathematical Modeling of Earth and Environment Processes. Springer Proceedings in Earth and Environmental Sciences. Springer Cham, 380–394.

5. Галыбин А.Н., Якуш С.Е., 2022. Образование связанных трещин при нагреве изначально непроницаемой пористой матрицы. В сб.: Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах, 2022, 173–175.

6. Savruk M.P. 1981. Two-dimensional problems of elasticity for bodies with cracks. Kiev: Nauk. Dumka.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СКИММЕРОВ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ НЕФТЯНЫХ РАЗЛИВОВ С ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ В.П. Пахненко

¹нститут проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук 119526 Москва, пр. Вернадского, д.101, к.1

<u>terkin95@mail.ru</u>

Процессы локализации и ликвидации аварийных разливов нефти и нефтепродуктов предусматривают выполнение многофункционального комплекса задач, реализацию различных методов и использование технических средств. Вне зависимости от характера аварийного разлива нефтепродуктов первые меры по его ликвидации должны быть направлены именно на локализацию пятен, чтобы избежать распространения дальнейшего загрязнения новых участков и уменьшить площадь загрязнения.

Проблема устранения последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов не является новой, но в современных реалиях все еще остается актуальной. В настоящее время существует несколько методов отчистки нефтяного загрязнения на открытой воде и в акваториях. Первоначальной задачей всех подобных методов является обнаружение или локализация загрязненного участка воды (нефтяного пятна), после выполнения данного этапа приступают к его устранению – сбору и утилизации.

Методы очистки вод Мирового океана от нефти:

- локализация участка (с помощью плавающих ограждений бонов);
- сжигание на локализованных участках;
- удаление с помощью песка, обработанного особым составом в результате чего нефть прилипает к зернам песка и опускается на дно;
- поглощение нефти соломой, опилками, эмульсиями, диспергаторами, с помощью гипса;
- ряд биологических методов. Применение микроорганизмов, которые способны разлагать углеводороды вплоть до углекислоты и воды;
- использование специальных судов, оснащенных установками для сбора нефти с поверхности моря. Созданы специальные суда малых размеров, которые доставляются самолетами к месту аварии танкеров. Каждое такое судно может всасывать до 1,5 тыс. л нефтеводяной смеси, отделяя свыше 90 % нефти и закачивая ее в специальные плавучие емкости, буксируемые затем к берегу;
- использование скиммеров различных видов.

Одним из наиболее распространенных методов является механический сбор нефтепродуктов после локализации пятна боновыми заграждениями, которые обеспечивают достаточную для сбора толщину слоя нефти. Данный метод обладает рядом положительных качеств, а именно: пятно, окруженное подобным ограждением, можно отбуксировать в более удобное, а главное безопасное место для работы [1, 2].

Для устранения последствий разливов нефти и нефтепродуктов используются нефтесборщики - различные комбинации устройств для сбора углеводородов. Конечная цель любой операции по ликвидации разлива состоит в том, чтобы собрать максимальное экономически целесообразное количество разлитой нефти. Успешная система сбора нефти должна решать несколько взаимосвязанных задач по локализации значительного количества разлитой нефти, ее последующему сдерживанию от распространения, сосредоточению, сбору, откачке и накоплению. В рамках такой операции по ликвидации разлива функции сбора и насосной перекачки нефти часто выполняются скиммером. Все скиммеры осуществляют сбор нефти вместо сбора воды, но их конструкции значительно отличаются согласно предполагаемому использованию - например, в открытом море, в защищенных от волнения водах или на суше. Скиммеры для применения на воде оснащены системами обеспечения плавучести или поддержки, а более сложные конструкции могут быть самоходными и снабжены несколькими системами забора нефти, встроенными баками для накопления нефти и сепараторами для отделения воды от нефти.

Конструктивно большинство скиммеров устроены следующим образом. Заборное устройство скиммера отводит или собирает нефть с водной поверхности, направляя ее в насосную систему для перекачки в накопительный бак. Механизмы отвода нефтепродуктов с поверхности чаще всего включают олеофильные системы (основаны на прилипании нефти к движущейся поверхности), системах засасывания, гравитационных системах водослива, системах, которые поднимают нефтепродукты с поверхности с помощью механических черпаков, лент или ковшей.

Существует множество классификаций скиммеров. Как правило, их можно разделить на две основные подгруппы: олеофильные и неолеофильные. К первым можно отнести скиммеры по следующим конструктивным особенностям: дисковые, барабанные, тросы-швабры, щеточные, ленточные. К неолеофильным можно отнести: с вакуумным засасыванием, водосливные, ленточные, барабанные. В свою очередь все они будут иметь свои плюсы и недостатки при различных погодных условиях, при различных свойствах водной поверхности (наличие и отсутствие волн), при различных видах нефтепродуктов, которые нужно ликвидировать, при наличии и отсутствии различного мусора вокруг. Также нужно учитывать, что разные скиммеры имеют различную производительность сбора нефтепродуктов и могут зависеть от необходимого вспомогательного оборудования.

В олеофильных скиммерах (рисунок 1) применяются материалы, на которые налипает нефть, но при этом отталкивающие воду. Нефть прилипает к поверхности материала, чаще всего в форме диска, ленты, трос-швабры, барабана, или щетки. Которые при вращении захватывают нефть с поверхности воды. После сепарации от воды нефть счищается или выжимается из олеофильного материала и попадает в специальный резервуар, из которого перекачивается в накопительный бак. При использовании олеофильных устройств обычно достигается самое большое соотношение количества собранной нефти и забранной отдельно или вместе с нефтью воды (коэффициент забора нефти). Они наиболее эффективны при сборе нефтепродуктов средней вязкости от 100 до 2000 сентистоксов. Одним из недостатков такого способа является то, что маловязкие нефтепродукты, такие как дизельное топливо и керосин, не скапливаются на олеофильных поверхностях достаточно толстым слоем, что не позволяет достичь высокой эффективности забора. При этом нефтепродукты с более высокой вязкостью, такие как бункерное топливо, являются слишком липкими для данного метода и с трудом поддаются удалению с поверхности олеофильного скиммера. Также водонефтяные эмульсии могут быть почти нелипкими и трудно поддаются забору устройствами олеофильного типа некоторых конструкций. Например, дисковые скиммеры проходят сквозь эмульсию вместо ее забора. Олеофильные устройства обычно изготавливаются из полимерных материалов, хотя была доказана эффективность и металлических поверхностей. Также доказано, что диски и барабаны с бороздчатыми поверхностями обеспечивают более высокую производительность забора нефти, чем аналогичные устройства с гладкой поверхностью [3].



Рисунок 1. Олеофильный барабанный скиммер

С теоретической точки зрения простейшей конструкцией является засасывающее устройство, в котором сбор нефти осуществляется насосами или вакуумными системами непосредственно с поверхности воды. В частности, передвижные вакуумные установки, объединяющие устройства для сбора, накопления, транспортировки и разделения нефтепродуктов и воды обычно легкодоступны вблизи от места аварийного разлива и в таком виде удобны для сбора нефти на берегу или в прибрежной зоне. Простейший метод сбора нефтепродуктов – это погружение приемного рукава с сетчатым экраном для блокирования прохода мусора непосредственно в плавающую или оказавшуюся на мели нефть. К явным недостаткам таких методов стоит отнести следующий: во время такой очистки наряду с нефтью может быть забрано большое количество воды. Если это допускается нормативами и имеется необходимое оборудование, то излишек воды должен быть слит из резервуара для оптимального использования накопительного бака для нефти.

Более высокой избирательности при сборе нефти иногда можно достичь путем присоединения к приемному рукаву водосливного устройства. При использовании водосливных скиммеров избирательный забор нефтепродуктов с водной поверхности обеспечивается действием силы притяжения. При размещении края водосливного устройства на поверхности раздела плавающей нефти и воды или чуть ниже этой поверхности нефть протекает по водосливу и собирается вместе с минимальным количеством воды. Современные типы водосливных очистных vстройств снабжены регулируемыми водосливными системами, точное вертикальное позиционирование которых достигается путем автоматического выравнивания. Ни один из видов водосливных скиммеров не эффективен при волнении на поверхности воды, хотя само по себе волнение обычно не мешает работе скиммера. Для исключения потери энергии на трение в перекачивающих рукавах некоторые водосливные скиммеры снабжаются бортовым насосом, чтобы собранная нефть прокачивалась по рукаву, а не только засасывалась, однако все равно данные методы имеют ряд ограничений и недостатков.



Рисунок 2. Ленточный скиммер

Выбор эффективного скиммера зависит от вида разлитого нефтепродукта. По мере выветривания нефти эффективность скиммера конкретной конструкции может изменяться с необходимостью перехода на альтернативную конструкцию для продолжения сбора нефти. Производительность сбора нефти принимается для однородного нефтяного пятна, не претерпевшего широкого распространения или рассеивания.

При выборе скиммеров необходимо учитывать ряд факторов, важнейшими из которых являются вязкость и адгезионные свойства разлитой нефти (включая любое изменение характеристик нефти под действием выветривания с течением времени), а также волнение на море и количество мусора. В сравнительно предсказуемых ситуациях, таких как разливы на стационарных объектах, например, на морских нефтебазах и нефтеперерабатывающих предприятиях, вид нефти может быть заранее известен, поэтому может быть выбран скиммер подходящей конструкции. И, наоборот, для отличающихся ситуаций и разливов разных видов нефти может быть предпочтительнее включить в государственные инвентарные запасы многофункциональный скиммер. Ни один конкретный вид скиммера не может быть пригоден для всех ситуаций, которые могут иметь место в результате разлива нефти, поэтому может потребоваться набор скиммеров для выборочного использования в зависимости от ситуации, в частности, при выветривании нефти.

Необходимо определить предполагаемый характер использования и ожидаемые условия функционирования скиммера, например, должен ли скиммер быть встроен в смонтированную на судне систему сбора нефти на море или применяться вручную в порту или на побережье. После установления этих условий использования могут быть определены другие критерии, такие как размер, надежность, простота в эксплуатации, в обращении и техобслуживании.

В докладе представлена классификация скимееров для ликвидации углеводородов с поверхности воды с выделением положительных и отрицательных сторон различных методик.

Более детально были рассмотрены преимущества различных скиммеров для осуществления сбора нефтепродуктов с водной поверхности. Которые должны быть сопоставлены со сложившимися условиями, такими как волнение моря, ветер, течения и местоположение экологически уязвимых зон. Вид собираемой нефти, ее вязкость при определенной температуре окружающей среды и любое изменение со временем диктуют наиболее эффективный вид собирающего устройства. При выборе наиболее подходящего скиммера должны учитываться характеристики пропускной способности, конструктивные особенности, надежности, прочности, эксплуатации, вес, универсальность, источник электропитания, техобслуживание и затраты.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки 123021700046-4 (FFGN-2023-0006).

Литература/References:

1. Владимиров В.А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1, Т. 4. С. 217-229.

2. Предупреждение и ликвидация аварийных разливов нефти и нефтепродуктов // Охрана окружающей среды, природопользование и обеспечение экологической безопасности в Санкт-Петербурге в 2002 году. Спб.: 2003. С. 302 - 313.

3. Documents & Guides The international tanker owners pollution federation limited, ITOPF, www.itopf.org.

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СКИММЕРА ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗЛИВОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДЫ

В.П. Пахненко

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук 119526 Москва, пр. Вернадского, д.101, к.1

terkin95@mail.ru

Конечная цель любой операции по ликвидации разлива состоит в том, чтобы собрать максимальное экономически целесообразное количество разлитой нефти. Успешная система сбора нефти должна решать несколько взаимосвязанных задач по локализации значительного количества разлитой нефти, ее последующему сдерживанию от распространения, сосредоточению, сбору, откачке и накоплению. Вне зависимости от характера аварийного разлива нефтепродуктов первые меры по его ликвидации должны быть направлены именно на локализацию пятен, чтобы избежать распространения дальнейшего загрязнения новых участков и уменьшить площадь загрязнения. В рамках такой операции по ликвидации разлива функции сбора и насосной перекачки нефти часто выполняются скиммером. Все подобные устройства осуществляют сбор нефти вместо сбора воды, но их конструкции значительно отличаются согласно предполагаемому использованию - например, в открытом море, в защищенных от волнения водах или на суше. Скиммеры для применения на воде оснащены системами обеспечения плавучести или поддержки, а более сложные конструкции могут быть самоходными и сепараторами для отделения воды от нефти.

Несмотря на большое количество существующих скиммеров разных конструкций, предназначающихся для разных задач и условий, все они обладают как своими положительными качествами, так и недостатками, поэтому некоторые существующие конструкции можно улучшить и доработать. Предложенное далее устройство для сбора нефтепродуктов с поверхности воды направлено на повышение эффективности сбора нефтепродуктов. Изобретение относится к технике очистки водной поверхности от жидких загрязнений, преимущественно от нефтепродуктов. Устройство работает по принципу создания в воде вихревой воронки, которая в свою очередь приводит к сепарации воды и нефтепродуктов, что приводит к оптимизации цикла отчистки воды.

Указанный результат достигается тем, что предложенное устройство для сбора нефтепродуктов с поверхности воды, включает открытый сверху цилиндрический стакан, средство создание вихревой воронки с приводом его вращения и средство откачки собираемых нефтепродуктов. При этом средство создания вихря выполнено в виде упомянутого стакана, который в свою очередь имеет возможность перемещения по высоте, а привод его вращения снабжен блоком управления. Выход блока управления соединен с приводом вращения стакана, а входы с различными датчиками: измерителями вязкости воды и нефтепродукта, измерителями плотности воды и собираемого нефтепродукта, измерителем толщины слоя нефтепродукта и средства измерения глубины погружения верхней кромки стакана от границы раздела «вода-нефтепродукт». При этом торец приемного патрубка (средства откачки нефтепродукта) размещен ниже верхнего торца стакана на величину H/2, где H - высота стакана.

У данного скиммера есть ряд отличительных признаков:

1. выполнение средства создания вихревой воронки в виде цилиндрического стакана, снабженного приводом его вращения;

2. стакан снабжен средством его перемещения по высоте;

3. привод вращения снабжен блоком управления, выход которого соединен с приводом вращения стакана, а входы - с измерителями вязкости воды и нефтепродукта, измерителями плотности воды и собираемого нефтепродукта, измерителем толщины слоя нефтепродукта и средства измерения глубины погружения верхней кромки стакана от границы раздела «воданефтепродукт»;

4. торец приемного патрубка средства откачки нефтепродукта размещен ниже верхнего торца стакана на величину *H*/2, где *H* - высота стакана.

Было экспериментально установлено, что вращение стакана в виде полого цилиндра приводит к формированию вихревой воронки внутри объема цилиндра. А из уровня техники известно (см. [1], [2], [3]), что если на поверхности воды присутствуют нефтепродукты, то происходит разделение водной и нефтяной фракций в вихре. Таким образом отпадает необходимость в наличии средств, в виде винтов, струйных насосов и т.д., специально предназначенных для создания вихревой воронки, что упрощает конструкцию.

При этом оснащение стакана средством его перемещения по высоте позволяет устанавливать его погруженным на глубину, которая будет обеспечивать самые оптимальные условия работы устройства, что в свою очередь положительно скажется на его эффективности.

Сущность заявляемого устройства поясняется примером реализации и графическими материалами. На рисунке 1 представлена принципиальная схема реализации устройства. В основу всей нефтесобирающей конструкции положен основной отдельный элемент для отчистки воды, представляющий собой цилиндрический стакан, вращающийся вокруг своей продольной оси и направленный вертикально своим открытым концом к поверхности воды, загрязнённой нефтепродуктами. Внутрь цилиндрического стакана через отверстие в дне вдоль оси вращения на заранее установленную длину введена открытым концом трубка, предназначенная для отвода собираемой с поверхности нефти, второй конец которой подсоединён к насосной системе. Насосная система по гибкому шлангу отводит отсасываемую нефть в специальный накопительный резервуар.



Рисунок 1. Схема модели скиммера для удаления нефтепродуктов с поверхности воды

Устройство содержит полый цилиндрический стакан, который снабжен приводом его вращения с блоком его управления. Привод может быть выбран из числа известных и доступных, а в качестве блока управления может быть использован компьютер, снабженный соответствующим программным обеспечением. К входам блока управления подсоединены различные датчики. Кроме того, предусматриваются средства, обеспечивающие перемещение стакана по высоте с тем, чтобы можно было регулировать глубину его погружения. Например, это может быть вертикально перемещаемый кронштейн с закрепленным на нем устройством, снабженный специальным механизмом его вертикального перемещения, который закреплен на судне-носителе. Все узлы и блоки, входящие в состав предлагаемого устройства, выбираются из числа известных.

Принцип работы данного скиммера основан на явлении формирования вихревой каверны, образующейся при вращении дна или стенок (или одновременном вращении дна и стенок) цилиндрической обечайки (рисунок 1). Характерной особенностью такой вихревой каверны является разделение водной и нефтяной фракций в вихре, что было показано в различных экспериментальных работах [4]. Это позволяет путём подбора скорости вращения обечайки обеспечить расположение открытого конца трубки скиммера в нефтяной части составного вихря, что при работающем насосе приводит к отбору нефти из составного вихря и транспортировку её к месту сбора по гибкому шлангу. Возникающий дефицит нефти в составном вихре моментально восполняется нефтью с поверхности, что приводит к непрерывному сбору нефтепродуктов с поверхности воды.

Соответственно получаем следующий цикл использования устройства. На месте разлива нефтепродуктов на поверхности водоема полый стакан скиммера погружается на некоторую глубину с помощью предустановленного средств. Далее с помощью входящих в состав устройства датчиков измерений определяются параметры жидкости и нефтепродуктов, необходимые для расчета оптимальных условий эксплуатации. Результаты измерений поступают в блок управления, который в соответствии с имеющейся в нем программой производит необходимые расчеты и устанавливает с помощью средства погружения необходимую глубину размещения стакана. На основании расчета вырабатывается командное воздействие на привод вращения полого стакана, который приводится во вращение с расчетной скоростью.

Поскольку введенные в состав устройства средства измерения параметров жидкостей и глубины погружения стакана работают в режиме онлайн, то при их изменении блок управления оперативно вносит изменения в режимы вращения стакана и глубину его погружения. В результате в средство откачки нефтепродукта поступает только собираемый нефтепродукт без

примесей воды или с минимальным ее количеством.

Так же было экспериментально установлено [5], что форма и размеры нефтяной части составного вихря зависят от целого ряда параметров, а именно: толщины слоя нефтепродукта на поверхности воды, плотности и кинематической вязкости воды и удаляемых нефтепродуктов. В поставленных экспериментах использовались различные нефтепродукты и масла, такие как: подсолнечное масло, смесь подсолнечного масла и дизельного топлива в равных пропорциях, нефть, дизельное топливо.

В результате аналитической обработки экспериментальных данных удалось установить эмпирические зависимости оптимальных режимов осуществления цикла отчистки водной поверхности в зависимости от свойств нефтепродукта и состояния водной среды водоема, на поверхности которого этот нефтепродукт находится. В частности, было установлено, что оптимальную глубину погружения *h* верхней кромки полого стакана от границы раздела «воданефтепродукт», целесообразно определять по математическими зависимостям:

$$h < \frac{H}{\alpha^2 - 1}, \alpha = 1 + \frac{\rho_{\scriptscriptstyle B}}{\rho_{\scriptscriptstyle H}} \sqrt{\frac{v_{\scriptscriptstyle B}}{v_{\scriptscriptstyle H}}}$$

где *h* - глубина погружения верхней кромки стакана от границы раздела «вода-нефтепродукт», м; *H* - высота стакана, м; $\rho_{\rm B}$, - плотность воды, кг/м³; $\rho_{\rm H}$ – плотности нефти, кг/м³; $v_{\rm B}$ - кинематическая вязкость воды, м²/с; $v_{\rm H}$ – кинематическая вязкость нефти, м²/с,

а оптимальную угловую частоту вращения стакана ω можно определить по зависимости:

$$\omega = \frac{1}{R_{\rm II}} \sqrt{g \frac{(H+2h+\Delta)(\rho_{\rm B}+\rho_{\rm H})}{(1+\alpha^2)\rho_{\rm B}-\rho_{\rm H}}}$$

где $R_{\rm ц}$ – радиус стакана, м; Δ – толщина слоя нефтепродукта на поверхности воды, м; g – гравитационное ускорение, м/с².

А для того, чтобы обеспечить оптимальные условия работы данного устройства и его высокую эффективность необходимо получать данные о параметрах, включенных в приведенные выше математические выражения. Поэтому устройство снабжается измерителями плотности воды и собираемого нефтепродукта, измерителями вязкости воды и нефтепродукта, измерителем толщины слоя нефтепродукта и средством измерения глубины погружения верхней кромки стакана от границы раздела «вода-нефтепродукт». Соответствующие данные поступают в блок управления, обрабатываются и сформированное управляющее воздействие поступает на привод вращения стакана.

Опытным путем было установлено, что оптимальное расположение торца приемного патрубка средства откачки нефтепродукта в нефтяной части составного вихря, (торец приемного патрубка средства откачки нефтепродукта размещен ниже верхнего торца стакана на величину H/2, где H - высота стакана) при работающем насосе приводит к отбору только нефти из составного вихря и транспортировку её к месту сбора по гибкому шлангу. Возникающий дефицит нефти в составном вихре тут же восполняется нефтью с поверхности, что приводит к непрерывному сбору нефтепродуктов с поверхности воды.

Сейчас ведется работа по созданию действующего макета данного скиммера. Была построена компьютерная модель отдельных сложных элементов конструкции образца для последующей печати на 3d принтере. Начиная от различных шестеренок и небольших элементов устройства (рисунок 2) до самого стакана, различных форм (рисунок 3), чтобы в последствии экспериментально установить более эффективный вариант.



Рисунок 2. Модель элементов конструкции скиммера для 3d печати



Рисунок 3. Модель центрального стакана конструкции скиммера для 3d печати

Была предложена уникальная модель скиммера, принцип работы которого основан на явлении формирования вихревой каверны. Данный скиммер обладает уникальными конструктивными особенностями и позволяет проводить более эффективный цикл очистки водной поверхности от нефтепродуктов. Были представлены элементы компьютерной модели данного скиммера для его последующей 3d печати.

С учетом проведенного анализа различных способов ликвидации углеводородов и полученной 3d модели макета, планируется дальнейшая проработка конструкции макета. Изготовление опытного образца для эффективного полного цикла процесса отчистки поверхности воды с использованием 3d принтера Picaso, а также испытание опытного образца в лабораторных условиях.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках Госзадания Минобрнауки 123021700046-4 (FFGN-2023-0006).

Литература/References:

1. Дмитриев В.Г., Гончаров В.В. Устройство для сбора нефтепродуктов с поверхности воды, Патент RU 2010090С1.

2. Кузнецов Н.П., Третьяков В.А., Чембровская А.И. Устройство для сбора нефтепродуктов с поверхности воды, Патент RU 2010090С1.

3. Слободяник И.П. Установка для удаления нефти и нефтепродуктов с болотистой водной поверхности, Патент SU 458136.

4. Наумов И.В., Чаплина Т.О., Степанова Е.В. Исследование влияния индуктора вихревого течения на форму границы раздела двух несмешивающихся жидкостей, № 1(23), 2020, С. 599-610.

5. Kistovich A.V., Chaplina T.O., Analytical and experimental modeling of the hydrocarbon slick form and its spreading on the water surface, Physics of Fluids, vol. 33, 2021.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ОСВОЕНИЯ ТЕПЛА «СУХИХ» ГОРНЫХ ПОРОД В.Р. Ахмедзянов, Е.Л. Прикащикова

Геологический институт РАН, Москва, Россия, gin@ginras.ru

Огромное значение для энергетики будущего имеет извлечение тепловой энергии, заключенной в «сухих» горных породах – то есть петротермальных ресурсов. Это наиболее крупные и широко распространенные источники энергии, потому что горячие скальные породы, залегающие на разных глубинах, есть повсюду. Геотермальная энергия, заключенная в твердых горячих породах составляет около 99 % от общих ресурсов подземной тепловой энергии [1].

По имеющим данным, общий ресурс тепловой энергии Земли, размещенной на глубинах до 10 км, эквивалентен тепловому потенциалу сжигания 34.1 · 10⁹ млрд тонн условного топлива. Это в несколько тысяч раз больше тепловой способности всех известных запасов топлива на Земле.

Петротермальный принцип подразумевает закачку воды в глубокую скважину с разогретой породой, где жидкость превращается в пар и возвращается обратно на турбину электростанции.

Необходимо пробурить как минимум две скважины: в одну с поверхности будет подаваться вода, чтобы от тепла пород превратиться в пар или двухфазную смесь и выйти через другую скважину. А далее процесс получения электроэнергии будет полностью аналогичен гидротермальной станции.

Естественно, соединить под землей на глубине нескольких километров две скважины нереально — вода между ними сообщается за счет разломов, образующихся в результате закачивания жидкости под огромным давлением (гидроразрыв). Чтобы расщелины и пустоты не закрылись со временем, к воде добавляют гранулы, например, песок [2].

Поскольку пока такие системы реализованы на промышленном уровне достаточно редко, например, в Австралии (Cooperbasin) или во Франции (Soultz), то зачастую приходится их изучать с помощью методов моделирования. В статье описана модель двухскважинной циркуляционной системы на глубинах 3000-3500 м.



Рисунок 1. Геометрия рассчитанной модели

В модели рассматривались только забои нагнетательной и продуктивной скважин в водопроницаемом слое (сами скважины в расчете не участвовали). Расстояние между забоями 250 м, длина забойной части 20 м и радиус 1 м. Сама модель трехслойная и представляет собой куб 500×500 м (Рис. 1).

В таблице 1 приведены свойства пород. В модели рассмотрены три осадочных слоя. Наиболее проницаемый - средний. В идеале должен присутствовать трещиноватый резервуар в непроницаемых скальных породах. Но в данном случае приведен пример для осадочного чехла.

| Слой | Свойство | Значение |
|--------------|------------------|----------------------------------|
| | Теплопроводность | 2 Вт/(м·К) |
| | Плотность | 1300 кг/м ³ |
| Верхний слой | Теплоемкость | 900 Дж/(кг·К) |
| | Пористость | 0,1 |
| | Проницаемость | 10 ⁻¹⁴ м ² |

| | 1. | <u>a</u> v | | 0 0 | |
|--------|----|------------|--------------------------|-------------|----------|
| | | DOLLOTDO | TODOT T | novenoutiou | MODOTIA |
| aunnia | | с воиства | $\mathbf{H}(\mathbf{M})$ | псаслоинои | WU/IC/IV |
| | •• | 000110100 | mopog r | p •• | |
| | | | | | |

| | Теплопроводность | 3 Вт/(м·К) |
|--------------|------------------|----------------------------------|
| | Плотность | 1900 кг/м ³ |
| Средний слой | Теплоемкость | 850 Дж/(кг·К) |
| | Пористость | 0,4 |
| | Проницаемость | 10 ⁻¹⁰ м ² |
| | | |

| | Теплопроводность | 3,5 Bt/(м·К) |
|-------------|------------------|----------------------------------|
| | Плотность | 2300 кг/м ³ |
| Нижний слой | Теплоемкость | 850 Дж/(кг·К) |
| | Пористость | 0,3 |
| | Проницаемость | 10 ⁻¹¹ м ² |



Рисунок 2. Разбиение модели сеткой конечных элементов

Решение модели вычислялось с помощью метода конечных элементов (Рис. 2), реализованном в пакете Comsol Multiphysics [3]. В отличие от метода конечных разностей МКЭ позволяет производить расчеты для произвольной формы обрабатываемой области.



Рисунок 3. Результат моделирования. Шкала температур дана в градусах Цельсия, стрелками показано направление потока воды

Расчет поля скоростей потока воды в пористой среде проводился на основе закона Дарси. Решение применялось нестационарное для периода времени 15 лет. На рис. 3 приведен результат моделирования для значения времени 15 лет. Видно, что в районе нагнетательной скважины наблюдается пониженные значения температуры, в районе продуктивной – повышенные.

В качестве начальных условий в породах задавался геотермический градиент 30 °С/км и температура на поверхности земли 10 °С. Скорость закачки и откачки воды составляла 40 л/с. Температура закачиваемой воды 5 °С.

На действующей петротермальной станции Сульц-су-Форе во Франции производительность пароводяной смеси составляет 25 кг/с, а температура закачиваемой воды 40°С. Температура на глубине 3.9 км составляет 168 °С (градиент более 40 °С/км).



Рисунок 4. Изменение температуры в продуктивной скважине со временем

На рис. 4 представлена динамика температуры в продуктивной скважине. По истечении 15 лет температура на выходе падает до 60 °C.

При температуре теплоносителя менее 100 °С для производства электроэнергии требуется строить сложную бинарную геотермальную станцию, цикл которой был изобретен в СССР. В ней жидкость из скважины вообще не подается на турбину. Вместо этого в теплообменнике она разогревает другую рабочую жидкость с меньшей температурой кипения, которая, превращаясь в пар, раскручивает турбину, конденсируется и вновь возвращается в теплообменную камеру [4]. В
роли таких рабочих жидкостей может выступать, например, фреон, один из видов которого (фтордихлорбромметан) кипит уже при 51.9 °C. В 2006 году в Чина-Хот-Спрингс, штат Аляска, заработала станция бинарного цикла, производящая электричество с рекордно низкой температурой жидкости 57 °C.

Если же рассматривать модель с большим геотермическим градиентом (например, 50 °С/км), то искомая температура на забое будет 150 °С и выше. При таких температурах утилизация петротермальных ресурсов для целей энергетики и, особенно, теплоснабжения становится актуальной и рентабельной. Однако такие высокие градиенты температуры редко встречаются на территории России. Они обнаруживаются только на территории Северного Кавказа (Ставропольский свод, Восточное Предкавказье), в некоторых районах Западной Сибири, в Тункинской впадине Прибайкалья и в Курило-Камчатском регионе.

Что касается мировой практики, то, например, на станции Сульц-су-Форе к 1995 году были пробурены скважины глубиной до 3.9 км. Температура добываемой воды составляла 136 °С, при тепловой мощности 9 МВт. К 2003 году скважины углубили до 5.1 км. На выходе из коллектора удалось получить теплоноситель с температурой около 160 °С. Было начато строительство электростанции, которая была запущена в сентябре 2016 года и с тех пор успешно эксплуатируется в непрерывном режиме. Её электрическая мощность составляет 1.7 МВт.

Общий экономический потенциал месторождений термальных вод в России оценивается в 50.1 миллионов тонн у.т./год при традиционной фонтанной эксплуатации и в 114.9 миллионов тонн у.т./год - при ГЦС эксплуатации.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы Лаборатории тепломассопереноса ГИН РАН №122012700311-2.

Литература/References:

- 1. Хуторской М.Д., Керимов В.Ю., Косьянов В.А. Возобновляемая и нетрадиционная энергетика мировые и отечественные тенденции развития. Монография. Москва, 2021. 208 с.
- 2. Геотермальная энергетика: как тепло Земли превратили в эффективный энергоресурс. https://habr.com/ru/companies/toshibarus/articles/442632/
- 3. Официальный сайт ComsolMultiphysics по созданию моделей методом конечных элементов. <u>https://www.comsol.ru/model/geothermal-doublet-29751</u>
- 4. Алхасов А. Б. Возобновляемые источники энергии. М.: Изд. дом МЭИ.2016. 256с.

ПЕРСПЕКТИВЫ УГЛЕРОДНОЙ НЕЙТРАЛЬНОСТИ РОССИИ: РАСЧЕТ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ЗАТРАТ

Дегтярев К.С.¹, Березкин М.Ю.¹, Показеев К.В.², Соловьев Д.А.³

¹Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия, kir1111@rambler.ru, mberezkin@inbox.ru

²Физический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, РФ,sea@phys.msu.ru ³Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, РФ, solovev@ocean.ru

Проводится анализ перспектив углеродной нейтральности на основе идей концепции перехода к ноосферному этапу эволюции человечества, основанному на гармоничном взаимодействии человека и природы. Предложена методика расчета инвестиционных затрат на достижение углеродной нейтральности в России. Рассматривается девять сценариев с разными объемами энергопотребления и различными долями неуглеродных источников энергии (атомной, гидравлической, ветровой и солнечной) с оценкой потребности в генерирующих мощностях и инвестиционных затратах для каждого сценария. Показано, что сумма инвестиционных затрат на обеспечение углеродной нейтральности без учета поглощающей способности экосистем варьируется от 200 трлн до 350 трлн рублей (от 5 до 9 трлн рублей в год) и представляет собой значительный вызов для российской экономики. В заключении подчеркивается важность поддержки со стороны государства, разработки эффективной энергетической политики и мобилизации финансовых ресурсов для исследований и разработки новых технологий.

В докладе «Преодолевая пределы» идея перехода к ноосферному этапу эволюции человечества, основанная на современных исследованиях в областях науки (кибернетики, биологии и геофизики), подразумевает более гармоничное сосуществование человека и окружающей среды, учитывая ограниченные ресурсы и необходимость устойчивого развития [1], [2]. Это концептуальное представление о будущем человечества может вдохновить стратегии по решению климатических и энергетических проблем [2]. Переход к ноосферному этапу эволюции подразумевает гармоничное взаимодействие человека и природы, а также осознанное использование ресурсов [3]. Это вполне согласуется с концепцией углеродной нейтральности, которая направлена на устойчивое сокращение выбросов парниковых газов, в первую очередь углерода, и на компенсацию оставшихся выбросов через поглощение углерода. Такой подход способствует уменьшению негативного воздействия человеческой деятельности на климат и окружающую среду.Исследования в областях кибернетики, биологии и геофизики могут способствовать разработке новых методов и технологий для достижения углеродной нейтральности, таких как более эффективные источники возобновляемой энергии, улучшенные методы углеродного секвестрования и технологии восстановления экосистем. Переход к углеродной нейтральности представляет собой значимый шаг в направлении устойчивого развития и снижения воздействия на окружающую среду [4], однако для его успешной реализации требуются дополнительные научные исследования и разработки. Важно рассмотреть некоторые ключевые аспекты этого сценария (по [4]):

<u>Доля ВИЭ (возобновляемых источников энергии)</u>. Увеличение доли ВИЭ в общем энергобалансе до более чем 40% к 2060 году означает значительное сокращение зависимости от ископаемых углеводородов, таких как нефть и уголь. Это позволит снизить выбросы парниковых газов и изменить энергетический ландшафт в сторону более чистых источников энергии.

<u>Атомная энергетика.</u> Увеличение доли ядерной энергетики в энергобалансе также предполагает большую роль атомной энергии в будущей энергетике. Атомная энергетика имеет низкие уровни выбросов парниковых газов, но также связана с рядом сложностей, включая управление радиоактивными отходами и безопасность.

<u>Технологические и инфраструктурные изменения.</u> Реализация амбициозных сценариев требует значительных технологических инноваций и инфраструктурных изменений. Необходимо разработать эффективные технологии хранения энергии, улучшить сетевую инфраструктуру и создать условия для расширения возобновляемых источников энергии.

Энергетическая политика и финансирование. Для успешной реализации такого перехода важна поддержка со стороны государства, разработка эффективной энергетической политики и обеспечение финансирования на исследования, разработку и внедрение новых технологий.

<u>Социальное принятие.</u> Успех энергетического перехода также зависит от социального принятия и поддержки общества. Важно обеспечить информированность общества о выгодах и рисках новых энергетических решений.

Создание методик оценки инвестиционных затрат на переход к углеродной нейтральности является важным этапом в реализации сценария глобального энергетического перехода. Расчет инвестиционных затрат позволяет более эффективно распределить ресурсы между различными проектами и мероприятиями, направленными на снижение выбросов парниковых газов. Это помогает избежать излишних затрат и обеспечить максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности. Что касается экономики России, расчет инвестиционных затрат на переход к углеродной нейтральности имеет особую важность. В первую очередь это связано с тем, что Россия является одной из крупнейших экономик мира и одним из ведущих производителей и потребителей энергии, основанной на ископаемых источниках. По данным

Международного энергетического агентства, в 2020 году Россия занимала четвертое место в мире по объему выбросов парниковых газов (ПГ), составивших 1,6 млрд тонн CO2-эквивалента [5]. Переход к углеродной нейтральности потребует значительных изменений в структуре энергетического сектора и других отраслях экономики, связанных с выбросами ПГ. Оценка инвестиций поможет разработать стратегии для адаптации к этим изменениям. Россия обладает значительным потенциалом в области возобновляемых источников энергии, в первую очередь, таких как солнечная и ветровая энергия [6]. Расчет инвестиций может помочь определить, какие ресурсы и финансирование необходимы для развития использования этих источников.

Предлагаемая методика расчёта была нами ранее апробирована в [7], [8]и использует следующие исходные допущения:

Не учитывается поглощающая способность экосистем – в виду высокой степени неопределённости в данном вопросе, а также исходя из преобладающих в мире подходов, предполагающих учёт именно антропогенной эмиссии и её непосредственного снижения, предполагается, что углеродная нейтральность достигается исключительно за счёт сведения к нулю антропогенных выбросов ПГ (парниковых газов)) [9];

Нулевая эмиссия ПГ будет достигнута к 2060 году;

Энергопотребление в стране должно быть полностью обеспечено за счёт электроэнергии, вырабатываемой на электростанциях, работающих на неуглеродных источниках – атомных станциях и ВИЭ (гидро-, ветровых и солнечных).

По состоянию на 2021 год энергопотребление в России оценивается на уровне 1180 млн тонн условного топлива [10] – что соответствует 9 600 ТВТч, или 9600·10⁹ кВтч; по данным [11] оно составило 8700·10⁹ кВтч. По данным [10], наблюдается плавная тенденция к росту потребления энергии в России: 948 млн т.у.т в 2005 году, 1 043 млн в 2010, 1 071 млн в 2015 и 1 180 млн в 2021. По данным, приведённым в [11], фиксируется аналогичная тенденция – рост с менее 26 ЭДж (7 222 ТВтч) в 2000 году до более 31 ЭДж в 2021.

Мы последовательно рассматриваем сценарии, в которых средний годовой объём энергопотребления в стране составляет 8 000, 10 000 и 12 000 ТВтч.

Отметим, что первый сценарий, при котором энергопотребление в 2060 году окажется ниже нынешнего уровня, также вероятен, учитывая возможности развития технологий энергосбережения в энергоёмких отраслях и на уровне ЖКХ. Также отметим, что с начала XXI века душевое энергопотребление в США, Западной Европе и Японии снижается со скоростью 0,5%-1% в год (по данным [11]); в Японии, при сокращении численности населения, потребление энергии снижается и в абсолютных единицах.

В настоящее время в РФ примерно 1140 ТВтч [11], или 13% всего энергопотребления, округлённо – 1200 ТВтч, обеспечивается неуглеродными источниками.

Таким образом, в качестве допущения нами предполагается, что, в зависимости от сценария, требуется дополнительно обеспечить за счёт электроэнергии, получаемой из неуглеродных источников:

8 000 – 1 200 = 6 800 ТВтч (6800·10⁹кВтч);

10 000 – 1 200 = 8 800 ТВтч (8800-10⁹кВтч);

12 000 – 1 200 = 10 800 ТВтч (10800·10⁹кВтч).

Для каждого из этих вариантов нами рассмотрены три сценария, предполагающие различные доли разных источников – атомной, гидравлической, ветровой и солнечной энергии, в данных объёмах производства. Таким образом, нами рассматривается 9 сценариев для разных объёмов энергопотребления и различных долей разных неуглеродных источников (табл. 1).

Доли разных источников энергии в сценариях были выбраны на основе следующих соображений:

Атомная энергия является одним из наиболее эффективных и надежных неуглеродных источников энергии, которые могут обеспечить высокий уровень энергетической безопасности и независимости России. Атомная энергетика также имеет высокий коэффициент использования

установленной мощности (КИУМ), что позволяет снизить инвестиционные затраты на единицу производимой электроэнергии. Поэтому во всех сценариях атомная энергия занимает 40-50% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Гидроэнергия также является важным неуглеродным источником энергии, который имеет ряд преимуществ, таких как возобновляемость, относительно низкие эксплуатационные затраты и возможность регулирования нагрузки. Россия обладает значительным гидроэнергетическим потенциалом, который может быть использован для увеличения доли гидроэнергии в энергобалансе. Во всех сценариях гидроэнергия составляет 30-40% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Ветровая и солнечная энергия являются перспективными возобновляемыми источниками энергии, которые могут способствовать диверсификации энергетического микса и снижению зависимости от импорта топлива. Однако, эти источники имеют низкий КИУМ и зависят от природных условий, что требует разработки эффективных технологий хранения и передачи электроэнергии. В разных сценариях ветровая и солнечная энергия занимают от 5 до 15% от общего объема производства электроэнергии из неуглеродных источников.

Существующий уровень развития и инфраструктуры для каждого источника энергии. Так, атомная и гидроэнергетика имеют более высокую скорость развития, чем ветровая и солнечная энергетика, так как Россия уже имеет значительный опыт и ресурсы в этих областях.

Потенциал и перспективы для каждого источника энергии. Ветровая и солнечная энергетика имеют больший потенциал для роста, чем атомная и гидроэнергетика, так как Россия располагает большими территориями с высокими ресурсами ветра и солнца.

| Источник | Сценарий 1 – 6 800 ТВтч | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------------|--|--|--|--|--|
| | Сценарий 1.1. | Сценарий 1.2. | Сценарий 1.3. | | | | | |
| Атомная энергия | 50% | 40% | 40% | | | | | |
| Гидроэнергия | 40% | 40% | 30% | | | | | |
| Ветровая энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |
| Солнечная энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |
| Источник | Сценарий 2 – 8 800 ТВт | Ч | | | | | | |
| | Сценарий 2.1. | Сценарий 2.2. | Сценарий 2.3. | | | | | |
| Атомная энергия | 50% | 40% | 40% | | | | | |
| Гидроэнергия | 40% | 40% | 30% | | | | | |
| Ветровая энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |
| Солнечная энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |
| Источник | Сценарий 3 – 10 800 ТВ | | | | | | | |
| | Сценарий 3.1. | Сценарий 3.2. | Сценарий 3.3. | | | | | |
| Атомная энергия | 50% | 40% | 40% | | | | | |
| Гидроэнергия | 40% | 40% | 30% | | | | | |
| Ветровая энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |
| Солнечная энергия | 5% | 10% | 15% | | | | | |

Таблица 1. Сценарии с разными объёмами энергопотребления и различными долями разных источников энергии

Технологические и экономические условия для каждого источника энергии. Атомная и гидроэнергетика требуют больших инвестиций и длительных сроков строительства, чем ветровая и солнечная энергетика, которые могут быть более гибкими и масштабируемыми.

Экологические и социальные последствия для каждого источника энергии. Например, атомная энергетика связана с рисками управления радиоактивными отходами и безопасности, а гидроэнергетика может оказывать негативное воздействие на окружающую среду и население.

Ветровая и солнечная энергетика имеют меньший уровень выбросов парниковых газов и меньше влияют на экосистемы.

Таким образом, в сценариях при выборе долей разных источников учитывается комплексный подход к оценке возможной скорости развития в России разных источников энергии, основанный на анализе различных аспектов: технических, экономических, экологических и социальных.

Исходя из объёма выработки электроэнергии данным источником, нами была рассчитана потребность в генерирующих мощностях на основе данных по среднему коэффициенту использования установленной мощности (КИУМ) для электростанций данных типов. По данным [12], КИУМ электростанций в России составил (округлённо до целых): АЭС – 84%, ГЭС – 48%, ВЭС – 28%, СЭС – 14%. Формула расчёта в данном случае: С = Р/8760 ч. КИУМ, где: С – требуемые мощности, ТВт; P – производство электроэнергии, ТВт·ч, 8760 – время, соответствующее 1-му году в часах, КИУМ - коэффициент использования установленной мощности (отношение количества фактически выработанной электроэнергии к тому количеству электроэнергии, которое было бы выработано, если бы электростанция работала с нагрузкой, соответствующей ее установленной мощности), %.

Рассмотрим расчёт потребностей в энергетических мощностях на примере сценария 1.1 (табл. 2), производство 6 800 ТВтч должно быть обеспечено в соотношении: 50% - за счёт АЭС, 40% - ГЭС, по 5% - ВЭС и СЭС.

| = | | | | | |
|----------|---------------|--------------|-----------------------------|-------|---------------------|
| Источник | Общая | Доли | Производство | КИУМ, | Требуемые |
| | потребность в | источников в | за счёт каждого | % | мощности, |
| | производстве | производстве | источника, | | кВт |
| | ЭЭ, ТВтч | ЭЭ, % | ТВтч (10 ⁹ кВтч) | | |
| АЭС | 6 800 | 50% | 3 400 | 84% | $462 \cdot 10^{6}$ |
| ГЭС | | 40% | 2 720 | 48% | $647 \cdot 10^{6}$ |
| ВЭС | | 5% | 340 | 28% | 139·10 ⁶ |
| СЭС | | 5% | 340 | 14% | $277 \cdot 10^{6}$ |

Таблица 2. Пример расчёта потребностей в энергетических мощностях

Далее, исходя из имеющихся данных по удельным инвестиционным затратам (на единицу установленной мощности): АЭС – 180 000 руб./кВт, ГЭС – 140 000 руб./кВт, ВЭС – 85 000 руб./кВт, СЭС – 65 000 руб./кВт [13], [14] (соответственно, и умножая эти величины на общие величины требуемых мощностей (табл. 2), рассчитываем общую величину инвестиционных затрат. Рассмотрим этот расчёт также на примере сценария 1.1. (табл. 3).

|--|

| Источник | Требуемые | Удельные | Общие инвестиционные |
|----------|----------------------|-------------------------|----------------------|
| | мощности, кВт (табл. | инвестиционные затраты, | затраты, млрд руб. |
| | 4) | млн. | |
| | | руб./кВт | |
| | | | |
| АЭС | $462 \cdot 10^{6}$ | 180 000 | 83 170 |
| ГЭС | $647 \cdot 10^{6}$ | 140 000 | 90 563 |
| ВЭС | 139·10 ⁶ | 85 000 | 11 782 |
| СЭС | 277.10^{6} | 65 000 | 18 020 |
| Всего | $1 525 \cdot 10^{6}$ | - | 203 536 |

Аналогичным образом рассчитываем потребности в генерирующих мощностях для каждого из обозначенных выше сценариев (табл.1).

Расчёты по обозначенным выше сценариям показывают, что сумма инвестиционных затрат на обеспечение углеродной нейтральности без учёта поглощающей способности экосистем варьируется от 200 трлн до 350 трлн рублей (рис. 1), или от 5 до 9 трлн. рублей в год (от 3% до 6% ВВП), исходя из срока её достижения к 2060 году.



России в зависимости от сценария. Источник: расчеты авторов.

По оценкам, приведённым ВТБ-Капитал, инвестиционные затраты России на переход к углеродной нейтральности могут составить величину, превышающую 400 трлн. рублей (около \$5 млрд.) [15].

Наши оценки близки оценкам ВТБ-Капитал и нашим предыдущим оценкам, но примерно в 3-5 раз превосходят цифры, указанные в Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года (далее Стратегия). В то же время, согласно Стратегии, сокращение антропогенных выбросов ПГ должно обеспечить всего 30% их общего снижения [16]. Очевидно, что инвестиции, требуемые для перехода к углеродной нейтральности, представляют собой значительный вызов для российской экономики. Однако, высокий коэффициент использования установленной мощности (КИУМ) у атомных и гидроэлектростанций может частично компенсировать высокие инвестиционные затраты.

Проведенные расчеты позволяют выбрать оптимальный путь энергетического перехода к углеродной нейтральности России, потому что они учитывают различные факторы, влияющие на эффективность и экономичность разных источников энергии. Среди этих факторов для каждого источника энергии можно выделить: существующий уровень развития и инфраструктуры; потенциал и перспективы; технологические и экономические условия; экологические и социальные последствия. Таким образом, результаты приведенных расчетов позволяют сравнить разные сценарии энергетического перехода и выбрать тот, который обеспечивает максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности при минимальных затратах и рисках.

Полученные результаты имеют важное значение для выбора оптимального пути перехода к углеродной нейтральности России. Они позволяют более эффективно распределить ресурсы между различными проектами и мероприятиями, направленными на снижение выбросов парниковых газов. Они также помогают избежать излишних затрат и обеспечить максимальную эффективность в достижении целей углеродной нейтральности. Кроме того, они способствуют развитию новых технологий и инноваций в области энергетики, которые могут повысить конкурентоспособность российской экономики на мировом рынке.

Для реализации целей энергетического перехода потребуется активная поддержка со стороны государства, разработка эффективной энергетической политики и мобилизации финансовых ресурсов для исследований и разработки новых технологий. Также необходимо обеспечить информированность и поддержку общества по вопросам углеродной нейтральности и ее выгод для экономики и окружающей среды.

Благодарности/Acknowledgments:

Работа выполнена в рамках госзаданий FMWE-2023-0001 и 121051400082-4

Литература/References:

- 1. Садовничий В.А., Аскаров А.А. Мировое развитие и «пределы роста» в XXI веке: моделирование и прогноз [Электронный ресурс]. 2022URL: https://expert.msu.ru/haos22-1? (дата обращения: 20.10.2022).
- Показеев К.В., Соловьев Д.А. «ПРЕОДОЛЕВАЯ ПРЕДЕЛЫ» НОВЫЙ ПРОЕКТ РЕШЕНИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ ПРОБЛЕМ ЧЕЛОВЕЧЕСТВА // Физическое и математическое моделирование процессов в геосредах: Восьмая международная научная конференцияшкола молодых ученых; 12-14 октября 2022 г., Москва: Материалы конференции. Москва: ИПМех РАН, 2022. С. 141–144.
- 3. Садовничий В.А., Акаев А.А., Ильин И.В., Коротаев А.В., Малков С.Ю. Моделирование и прогнозирование мировой динамики в XXI веке (препринт). Москва: МГУ им. М.В. Ломсоносова, 2022.
- 4. Акаев А.А., Давыдова О.И. Парижское климатическое соглашение вступает в силу. Состоится ли Великий энергетический переход? // Вестник Российской академии наук. 2020. № 10(90). С. 926–938.
- 5. Россия будет добиваться углеродной нейтральности к 2060 году [Электронный ресурс]. . 2021URL: https://news.un.org/ru/story/2021/10/1411842 (дата обращения: 31.08.2023).
- 6. Андреенко Т.И., Габдерахманова Т.С., Данилова О.В. Атлас ресурсов возобновляемой энергии на территории России: науч. издание. Москва: РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015.
- Берёзкин М.Ю., Дегтярев К.С., Синюгин О.А. Подходы к оценке инвестиционных затрат на глобальный энергетический переход // Окружающая среда и энерговедение. 2022. № 1. С. 4–17.
- 8. Дегтярёв К.С., Соловьев Д.А., Березкин М.Ю. Подходы к оценке затрат на переход к низкоуглеродному развитию в России // Энергетическая политика. 2023. № 6(184). С. 100–110. DOI:10.46920/2409-5516 2023 6184 100.
- 9. Замолодчиков Д.Г. Углеродный цикл и изменения климата // Окружающая среда и энерговедение. 2021. № 2. С. 53–69.
- 10. Баланс энергоресурсов 2005-2021 [Электронный ресурс]. 2023URL: https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/elbalans_2022.xlsx (дата обращения: 14.08.2023).
- Statistical Review of World Energy [Электронный ресурс]. 2023URL: https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-worldenergy.html (дата обращения: 14.08.2023).

- 12. Отчёт о функционировании ЕЭС России в 2021 году [Электронный pecypc]. 2022URL: https://www.so-ups.ru/fileadmin/files/company/reports/disclosure/2022/ups_rep2021.pdf (дата обращения: 14.08.2023).
- 13. Система государственного стимулирования хранения электроэнергии в России [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/489 (дата обращения: 14.08.2023).
- 14. Росатом предварительно обозначил предельную стоимость капитального строительства одного атомного кВт в 183 тыс. рублей [Электронный ресурс]. . 2022URL: https://www.atomic-energy.ru/news/2022/01/25/121255 (дата обращения: 14.08.2023).
- ВТБ Капитал представил оценку стоимости декарбонизации для российской экономики и ее отраслей [Электронный ресурс]. 2021URL: https://bankinform.ru/news/117904 (дата обращения: 14.08.2023).
- 16. Порфирьев Б.Н., Широв А.А. Стратегии социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов: сценарии и реалии для России // Вестник Российской академии наук. 2022. № 5(92). С. 415–423.

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ СКОРОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ

С.Ю. Касьянов

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, skas53@yandex.ru

В докладе обсуждается возможность построения на основе данных о рельефе литосферы оценки радиальной и азимутальной компонент скорости на верхней границе выхода горячего интенсивного внутримантийного вихря под восточной частью Средиземного моря [1].

Внутримантийный вихрь под восточной частью Средиземного моря представляет собой выход к дневной поверхности окончания крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море [1] и имеет циклоническую циркуляцию.

Рассматривается модельная задача о нахождении стационарного осесимметричного течения идеальной жидкости на горизонтальной верхней границе цилиндрической области при постоянном во времени давлении, распределение которого задается модельным рельефом литосферы. Используется модельный осесимметричный рельеф, который строится на основе данных о реальном рельефе литосферы восточной части Средиземного моря с учетом его основных особенностей.

Рассматриваются уравнения движения указанной модельной задачи и находится их стационарное осесимметричное решение. С учетом циклонического характера циркуляции крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море из двух возможных стационарных осесимметричных решений уравнений движения выбирается решение, описывающее циклоническую циркуляцию на границе внутримантийного вихря.

Циркуляция на верхней границе вихря резко разделяется на «глаз» вихря с медленным вращением и значительной положительной радиальной скоростью в центральной части вихря и относительно медленно вращающуюся периферическую часть со значительной отрицательной радиальной скоростью вихря. Азимутальная компонента скорости в периферической части вихря нарастает от периферии к центру по мере приближения к границе области «глаза» вихря, на границе «глаза» вихря достигает максимальных значений и претерпевает разрыв.

Сопоставление полученной структуры циркуляции в вихре с картой изостатических гравитационных аномалий показывает, что рельеф восточной части Средиземного моря образовался под влиянием выхода крупномасштабного энергонесущего вихря Йеллоустон-Средиземное море [1] и его эллипсообразная форма определяется пересечением цилиндрического энергонесущего вихря с поверхностью сферы дневной поверхности Земли. Областям минимума изостатических гравитационных аномалий соответствует область внешней окрестности стены

«глаза» вихря в западной и юго-западной части вихря, где вихрь расположен наиболее близко к дневной поверхности.

На границе «глаза» вихря может наблюдаться неустойчивость. В природе, с учетом неидеальности вещества вихря, на границе «глаза» вихря должно происходить интенсивное вихреобразование с диссипацией кинетической энергии в тепло. Последнее должно приводить к появлению на границе глаза вихря локальных зон интенсивного выделения эндогенного тепла со дна в воду, которые могут оказывать влияние на циркуляцию морских вод и климат.

Литература/References:

1. Kasyanov, S.Y., Samsonov, V.A. 2021. About the Modern System of Three Energy-Carrying Intensive Vortices in the Earth's Mantle. In: Chaplina, T. (eds) Processes in GeoMedia - Volume II. Springer Geology. Springer, Cham. pp 273–291. https://doi.org/10.1007/978-3-030-53521-6 31

О ВОЗМОЖНОМ ВЛИЯНИИ ИНТЕНСИВНОГО ВИХРЯ В МАНТИИ ПОД ОБЛАСТЬЮ ЯПОНСКОГО МОРЯ НА ФОРМИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА ЛИТОСФЕРЫ И ЦИРКУЛЯЦИЮ ВОД ЯПОНСКОГО МОРЯ

С.Ю. Касьянов

Государственный океанографический институт им. Н.Н. Зубова, Росгидромет, Москва, skas53@yandex.ru

Согласно выдвинутой в [1] гипотезе, рельеф литосферы области Японского моря образован выходом горячего интенсивного внутримантийного вихря под Японским морем.

В центральной части моря имеется резкое поднятие рельефа – подводные возвышенности Ямато. Структуру их центральной части можно представить себе как два смещенных относительно друг друга кольцевых поднятия, которые могли быть образованы двумя последовательными положениями глаза внутримантийного вихря.

Для случая осесимметричного рельефа литосферы над границей внутримантийного вихря (если принять в рассмотрение только одно из кольцевых поднятий рельефа дна моря, соответствующее современному положению глаза вихря) на основе данных о рельефе литосферы можно оценить радиальное распределение радиальной и азимутальной компонент скорости на верхней границе выхода вихря. При этом рассматривается модельная задача о нахождении стационарного осесимметричного течения идеальной жидкости на горизонтальной верхней границе цилиндрической области при постоянном во времени давлении, распределение которого задается модельным рельефом литосферы. Модельный осесимметричный рельеф строится на основе данных о реальном рельефе литосферы области Японского моря с учетом его основных особенностей.

Уравнения движения модельной задачи решаются численно. С учетом предложенного ранее в [1] механизма образования вихря при заглублении глиссирующего спутника находится стационарное осесимметричное решение уравнений движения, описывающее антициклоническую циркуляцию во внутримантийном вихре. В структуре циркуляции вихря выделяются относительно медленно вращающиеся области - периферическая часть и центральная область «глаза» вихря, и область стены «глаза» вихря на его внешней границе. В области стены «глаза» вихря азимутальная скорость быстро нарастает по мере приближения от периферии вихря к границе «глаза» вихря, на которой она достигает максимума и претерпевает разрыв. Резкому кольцевому поднятие рельефа в центральной части моря при этом соответствует область стены глаза внутримантийного вихря.

На границе глаза вихря может наблюдаться неустойчивость. В природе, с учетом неидеальности вещества вихря, на границе глаза вихря должно происходить интенсивное вихреобразование с диссипацией кинетической энергии в тепло. Последнее приводит к появлению на границе глаза вихря локальных зон интенсивного выделения эндогенного тепла со дна в воду (преимущественно в виде горячих источников), которые могут оказывать влияние на циркуляцию морских вод.

Анализ траекторий дрейфующих буев в Японском море подтвердил наличие областей антициклонической поверхностной циркуляции в окрестности подводных возвышенностей Ямато и циклонической циркуляции у японского берега. Одной из возможных причин существования такой циркуляции может являться влияние эндогенного тепла флюидов, исходящих от горячего интенсивного внутримантийного вихря под Японским морем.

Литература/References:

1. *Kasyanov, S.Y.* 2021. Formation of System of Intense Vortices in the Mantle When a Large Temporary Earth Satellite is Immersed. *In: Chaplina, T. (eds) Processes in GeoMedia—Volume III. Springer Geology. Springer, Cham. pp* 217–232. *https://doi.org/10.1007/978-3-030-69040-3_21*

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ В ОКЕАНОГРАФИИ

В.А. Соколов

Государственный океанографический Институтимени Н.Н. Зубова vasokolov@inbox.ru

В работе с позиции определения неравновесных термодинамических систем [1,2] доказывается применимость к анализу морских вод теории неравновесных термодинамических систем (THTC). Показывается, что такой подход позволяет:

- Получить ответы на вопросы по океанографическим процессам, неразрешимые в рамках теории равновесной термодинамики морских вод, исключающей существование в них сил диссипации, обеспечивающих существование в морских водах дрейфовых течений, существование в морских водах общей границы с неравновесной системой земной атмосферы, через которую происходит их обмен энергией и массой[4], а так же существование в морских водах различных водных масс (BM) [4,5], обеспечивающих много модальность статистических распределений морских вод, каждой моде которой соответствует своя BM;
- 2. Получить физическую трактовку много модальности статистики морских гидрологических полей (МГП) [4,6,7];
- На основе свойства морских вод уплотняться при их смешении [4] и применимости к морским водам принципа минимального производства их энтропии [1] объяснить стабильность свойств водных масс (BM) в морских водах во времени и пространстве [4-7];
- С позиции применимости к морским водам принципа минимального производства их энтропии получить объяснение минимизации изменений температуры – T, солёности-S и плотности морских вод – ρ, получаемой при одинаковости знаков изменений T и S в различных формах уравнения состояния морских вод (УСМВ) [4];
- 5. Выявить и описать системные дефекты современных методов интерполяции морских гидрологических полей, основанных на применении в них методов, разработанных для независимых скалярных полей, которые в морских водах отсутствуют. Статистика таких методов предполагает одно модальную форму, статистических распределений исследуемых полей, близкую к нормальному закону [3] и предложить новый способ совместной интерполяции морских полей свободный от отмеченных дефектов [7-9], основанный на применении в таких расчётах совместных эмпирических гистограмм совместной функций плотности вероятности температуры-Т и солёности – S морских вод (СФПВ Т-S) [6,7];
- 6. Обосновать применимость использования традиционных методов исследования морских вод за пределами морских фронтальных гидрологических зон в условиях

много модальных статистических распределений Т и S, и отсутствие физических обоснований применимости этих методов в зонах гидрологических фронтов.

Литература/References:

- 1. Пригожин И., Введение в термодинамику необратимых процессов, 2001, с. 127.
- 2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Теоретическая физика, в 10 томах М. Наука, 1988
- 3. Венцель Е. Теория вероятности. М. Высшая школа, 1999, 578 с.
- 4. Мамаев О.И. Термохалинный анализ вод Мирового океана. Л. Гидрометеоиздат, 1987, 296 с.
- 5. Добровольский А. Д. Об определении водных масс Океанология, 1961, т. 1 вып. 1 с. 12-24.
- 6. Соколов В.А., Показеев К.В. Свойства совместной статистики температуры, солёности, плотности морских вод и возможности их использования в океанографических исследованиях. Процессы в геосредах, 2018, № 4, ст. 1192-1197.
- 7. Соколов В.А. Закономерности и свойства совместных статистических распределений термохалинных полей Северной Атлантики и их использование при решении океанографических задач. Процессы в геосредах. 2016, №3. 267-277 (2016).
- 8. Гандин Л.С. Метод оптимальной интерполяции метеорологических полей. Л., Гидрометеоиздат, 1963 283 с.
- 9. Фортус М.И. Метод эмпирических ортогональных функций и его применение в метеорологии. Метеорология и гидрология, 1980, №4, с.113-119.

НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ УСТОЙЧИВОСТИ СКВАЖИН В КОЛЛЕКТОРАХ ПОДЗЕМНЫХ ХРАНИЛИЩ ГАЗА Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б.

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, ustinov@ipmnet.ru

Сохранение целостности скважин и предотвращение процессов пескопроявления являются одними из ключевых проблем эксплуатации подземных хранилищ газа. Ранее [1] авторами была выдвинута гипотеза, что ключевую роль в процессах разрушения и пескопроявления играет изменение пластового давления в залежи в целом, поскольку именно оно оказывает решающее влияние на величину напряжений, действующих в окрестности скважин. Это отличается от точки зрения многих исследователей, связывающих эти негативные процессы с изменением напряженного состояния в призабойной зоне пласта, вызванного депрессией/репрессией в скважинах [2,3]. Настоящая работа продолжает цикл исследований авторов [1], причем акцент делается на влияние таких факторов, как неравнокомпонентность исходного напряженного состояния и прочностная анизотропия пород коллектора.

Рассмотрим напряженное состояние вокруг горизонтальной скважины, расположенной в горизонтальном пласте-коллекторе. Исходное напряженное состояние массива в общем случае определяется шестью константами – шестью компонентами тензора напряжений, либо тремя главными напряжениями и тремя углами (например, углами Эйлера), определяющими направления действий главных напряжений относительно вертикали и сторон горизонта. Для коллекторов нефтяных и газовых месторождений, при отсутствии активной тектоники, наличие «ловушек» из непроницаемых пластичных пород, собственно и обуславливающих формирование месторождений флюидов, должно приводить к релаксации касательных напряжений в массиве, что позволяет предположить близость исходного напряженного состояния к равнокомпонентному сжатию [4, 5]. Тем не менее, в настоящее время возобладал подход, основанный на умозрительном предположении о неравнокомпонентности исходного напряженного состояния с одним из главных напряжений в вертикальном направлении. Итак, предположим, что исходное

напряженное состояние определяется главными напряжениями $\sigma_1 = \sigma_2, \sigma_3$ последнее из которых действует в вертикальном направлении. Соответственно для исходных эффективных напряжений, действующих в грунтовом скелете пласта, имеем

(1)
$$s_{ij}^{0} = \sigma_{ij}^{0} + (1 - \delta) p_{0} \delta_{ij}$$

где δ - доля площадок контактов относительно всей поверхности зерна грунтового скелета [4], p_0 - начальное пластовое давление. Здесь и далее сжимающие напряжения считаются отрицательными, давление – положительным. На контуре скважины с открытым забоем действует радиальное эффективное напряжение $s_{rr}^0 = -p_0\delta$. Окружные напряжения на контуре рассматриваемой скважины определяется из решения задачи Кирша (напр. [6]). Для эффективных напряжений в используемых обозначениях решение записывается в виде

$$s_{\theta\theta}^{0} = q_{1} + q_{3} - s_{rr}^{0} + 2(q_{1} - q_{3})\cos 2\theta$$
⁽²⁾

Здесь θ – угол, отсчитываемый от вертикали.

При изменении порового давления в пласте в процессе откачки-закачки происходит изменение напряженного состояния пласта. При этом характер изменения граничных условий определяется его геометрией. На боковых (вертикальных) поверхностях ввиду большой протяженности пласта в своей плоскости граничные условия соответствуют постоянству нормальных (горизонтальных) смещений $\Delta u_1 = \Delta u_2 = 0$ (оси 1 и 2 ориентированы в горизонтальных пласта). На горизонтальных поверхностях, постоянными сохраняются вертикальные напряжения $\Delta q_3 = 0$. Подставляя эти граничные условия в систему уравнений теории упругости и пренебрегая влияние градиента порового давления в процессе откачки-закачки [0], получаем для изменений главных эффективных напряжений в пласте и радиальных напряжений на контуре скважины от изменения пластового давления $\Delta p_{nл}$ ($\Delta p_{nn} < 0$ при пластовом давлении ниже начального $p_{nn} < p_0$, $\Delta p_{nn} > 0$ при пластовом давлении выше начального $p_{nn} > p_0$) $\Delta s_1 = \Delta s_2 = \frac{p_{Mn}}{1-\nu} (1-\delta) \Delta p_{nn}$, $\Delta s_3 = (1-\delta) \Delta p_{nn}$, $\Delta s_{rr} = -\Delta p_{nn} \delta$

Здесь *V*- коэффициент Пуассона. Изменение окружных напряжений на контуре скважины записываются аналогично (2) с заменой исходных напряжений на их приращения. Подстановка (3) в (2) с указанной заменой дает

$$\Delta s_{\theta\theta} = \left(1 + \frac{\nu}{1 - \nu} (1 - \delta)\right) \Delta p_{n\pi} - 2\frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} (1 - \delta) \Delta p_{n\pi} \cos 2\theta \tag{4}$$

Полные напряжения определяются суммой (2) и (4)

$$s_{\theta\theta} = q_1 + q_3 + p_0 (2 - \delta) - 2(q_3 - q_1) \cos 2\theta + \left(1 + \frac{\nu}{1 - \nu} (1 - \delta)\right) \Delta p_{nn} - 2 \frac{1 - 2\nu}{1 - \nu} (1 - \delta) \Delta p_{nn} \cos 2\theta$$
(5)

Распределения окружных напряжений, нормированных на величину вертикального напряжения, для ряда случаев представлены на рис. 1, где принято $q_3 = -1, q_1 = \eta q_3, p_0 = 0.44, v = 0.2, \delta = 0.2$. Величина Δp_{nn} принимается равной 0, 0.25 и -0.25 для условий исходного давления, максимальной закачки и максимального отбора газа, соответственно. Из приведенных графиков видно, что уменьшение пластового давления в процессе отбора газа существенно повышает действующие на контуре горизонтальной скважины кольцевые напряжения S_{aa} , которые достигают максимума в боковой точке при $\theta = \pi / 2$.

При отсутствии прочностной анизотропии разрушение следует опасаться в точках контура с максимальными по абсолютному значению напряжениями (4). При наличии прочностной анизотропии, как обусловленной наличием площадок ослабления, связанных с напластованием, так и атипичного типа, характерных для высокопористых слабых пород [7, 8], начала разрушения следует опасаться в точках контура, где действующие напряжения превысят предел прочности, зависящий от угла θ .

Таким образом, проведенные на основе геомеханического анализа исследования показали, что в результате изменения пластового давления исходное напряженное состояние в пласте, даже в случае изначально равномерного сжатия, становится неравнокомпонентным. Следствием этого является существенное увеличение напряжений, действующих в окрестности скважин, могущее привести к разрушению ее стенок и выносу песка в скважину.



Рисунок 1. Зависимости окружных напряжений на контуре горизонтальной скважины, нормированных на значение вертикального исходного напряжения, от угла, отсчитываемого от вертикали; при равнокомпонентном исходном напряженном состоянии массива (а), при коэффициенте бокового распора 0.7 (б); сплошные линии – исходное давление; пунктирные линии – условие максимальной закачки; штрих-пунктирные линии – условие максимальной откачки.

На основании выполненных расчетов были составлены программы нагружения образцов пород из коллекторов ряда ПХГ по которым на установке ИСТНН было выполнено физическое моделирование деформационных процессов, протекающих в призабойной зоне пластов ПХГ при циклическом изменении пластового давления в процессе закачки/отбора газа. В результате для конкретных пластов-объектов хранения газа были определены максимально допустимое снижение пластового давления газа и максимально допустимые депрессии на забое скважин, не приводящие к разрушению породы в их окрестности и выносу песка в скважину.

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, проект № 22-11-00273.

Литература/References:

- 1. Карев В. И., Королев Д.С., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. Геомеханическое и физическое моделирование деформационных процессов в пластах подземного хранилища газа при циклическом изменении пластового давления // Газовая промышленность. 2020. Спецвыпуск № 4 (808). С. 46-52.
- 2. Пятахин М.В. Геомеханические проблемы при эксплуатации скважин. М., Газпром ВНИИГАЗ, 2012, 266 с.
- 3. Morita N.: "Field and Laboratory Verification of Sand-Production Prediction Models".- SPE Drilling & Completion, December 1994, pp.227-235
- 4. Желтов Ю.П., Христианович С.А. О гидравлическом разрыве нефтеносного пласта // Известия Академии наук СССР. Отд. техн. наук. 1955. № 5. С. 3–41
- 5. Karev V., Kovalenko Y., Ustinov K. Geomechanics of Oil and Gas Wells Springer. 2020 184 p
- 6. Jaeger J.C., Cook N.G.W., Zimmerman R.W. Fundamentals of rock mechanics. Malden, Mass., Oxford: Blackwell, MyiLibrary, 2007. 475 p
- 7. Коваленко, Карев, Устинов МТТ Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б., Карев В.И. Геомеханический анализ образования вывалов на стенках скважин // Известия РАН МТТ. 2022. № 6. С. 157–172
- 8. Устинов К.Б., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Барков С.О., Химуля В.В., Шевцов Н. И. Экспериментальное исследование влияния анизотропии на ориентацию вывалов в скважинах //Известия РАН МТТ 2023 №2 14-18

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА В РАЗЛИЧНЫХ ЖИДКОСТЯХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ НАГРЕВЕ ПОВЕРХНОСТИ

К.Н. Захаров, Ю.Ю. Плаксина, А.В. Пуштаев,

Ю.К. Руденко, Н.А. Винниченко, А.В. Уваров

МГУ имени М.В. Ломоносова, Физический факультет, zaharov.kirill2001@yandex.ru

Проведённые ранее исследования показали, что на поверхности жидкости могут возникать различные граничные условия, которые обуславливаются наличием или отсутствием тонкой поверхностной плёнки [1-4]. В некоторых жидкостях (например, в этаноле) такой плёнки не образуется и удовлетворяются стандартные условия проскальзывания, а в жидкостях с высоким коэффициентом поверхностного натяжения (вода, глицерин) за счёт адсорбции различных примесей образуется поверхностная плёнка, которая препятствует массообмену поверхности с объёмом. Но поверхностная плёнка может рваться под действием напряжения (ветер, механическое смахивание верхнего слоя) и тогда, если она не успеет восстановится за счёт адсорбции, то возникает свободная поверхность. Помимо механического способа разрыва поверхностной плёнки, она может прорываться при возникновении достаточно большого градиента температуры из-за больших термокапиллярных сил. Удобство использования нагрева поверхности для анализа прочности пленки связано с возможностью фиксации поверхностного градиента температуры с помощью тепловизора, что позволяет получить количественные параметры поля сил, а также с возможностью вариации параметров при изменении мощности нагрева.

В данной работе с помощью ИК-термографии и метода Moon-Glade BOS [1] исследовались особенности распространения тепла в жидкостях при импульсном ИК-нагреве их поверхности и определялось влияния поверхностной плёнки на этот процесс. При нагреве сверху отсутствует стандартный термогравитационный механизм, связанный со всплытием нагретой области – нагретая область уже находится сверху. Основным механизмом конвекции в этом случае оказывается хорошо известный термокапиллярный механизм, но при наличии пленки этот механизм блокируется [2,3] и основной оказывается горизонтальная (или боковая) конвекция, также связанная с действием силы тяжести, но более сложным механизмом перераспределения давления [4].

Предварительные измерения с импульсным нагревом различных жидкостей ИК-лазером мощностью 10 Вт в течении 2 с. показали, что в различных жидкостях формы расплывания тепловых пятен отличаются друг от друга (рис. 1).



Рисунок 1. Термограммы нагрева и остывания различных жидкостей (светлые места тёплые, тёмные – холодные)

Для более устойчивой картины расплывания тепловых пятен в дальнейшем мы уменьшили мощность лазерного импульса.

Были проанализированы особенности распространения тепла в воде и водном растворе глицерина 66% (жидкости, на поверхности которых образуется плёнка), в этаноле 96% и силиконовом масле (жидкости, на поверхности которых плёнка не образуется) при малых мощностях лазера (до 5% от максимальной мощности – 40 Вт). Экспериментально полученные распределения температур и рельефы поверхности показали, что поверхностная плёнка блокирует конвекцию Марангони, тепловое пятно локализуется в окрестности точки нагрева в отличие от жидкости со свободной поверхностью, где тепловое пятно от импульсного нагрева расплывается заметно быстрее. При этом, нагрев поверхности с плёнкой сопровождается поднятием поверхности в центре нагрева, а при нагреве жидкости со свободной поверхностью в начальный момент возникает опускание поверхности, а затем вспучивание центра и образование сложной структуры с немонотонным рельефом. При остывании локально нагретой жидкости с плёнкой тепловое пятно рассасывается, а поверхность выравнивается, а в случае жидкости со свободной поверхностью в момент прекращения нагрева наблюдается подъём более холодного слоя жидкости по центру и затем выравнивание поверхности примерно за одну секунду. Также, было проведено сравнение экспериментально полученных радиальных профилей температуры для дистиллированной воды и рельефов поверхности для этанола и раствора глицерина 54% с численным моделированием. Сравнение показало, что постановка корректных граничных условий на поверхности жидкости позволяет довольно точно приблизить численный расчет к экспериментально полученными результатам.

Помимо экспериментов по исследованию распространения тепла по поверхности покоящейся жидкости, также проводились исследования в ветровом канале при различных скоростях обдува. Фиксируя с помощью ИК-термографии динамику распространения тепла по поверхности, мы обнаружили, что при импульсном нагреве движущийся поверхности с плёнкой тепловое пятно деформируется и может двигаться вместе с поверхностью как по ветру, так и против ветра, а в случае же свободной поверхности тепловое пятно движется по ветру и быстро рассасывается за счёт конвекции Марангони (рис. 2).



Рисунок 2. Изменение температуры поверхности воды (вид сверху) при скорости ветра 2,7 м/с: 1 - в момент импульса; 2 - через 0,28 с; 3 - через 0,68 с. А – пятно на свободной поверхности, Б – на поверхности с плёнкой

Таким образом, отслеживая движение теплового пятна по поверхности воды, мы можем сделать вывод о наличии или отсутствии поверхностной плёнки.

Работа была выполнена с использованием оборудования, приобретенного за счет средств Программы развития Московского университета.

Литература/References:

- Vinnichenko N. A., Pushtaev A. V., Plaksina Yu Yu, Uvarov A. V. Measurements of liquid surface relief with moon-glade background oriented Schlieren technique// Experimental Thermal and Fluid Science, 2020, V. 114, 110051
- Плаксина Ю.Ю., Пуштаев А. В., Винниченко Н. А., Уваров А. В. Влияние малых примесей на формирование структур при конвекции Рэлея—Бенара—Марангони в плоском слое жидкости // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2018, № 5. С. 55–61.
- 3. Plaksina Yu.Yu., Uvarov A. V., Vinnichenko N. A., and Lapshin V. B. Experimental investigation of near-surface small-scale structures at water-air interface: Background oriented schlieren and thermal imaging of water surface //Russian Journal of Earth Sciences, 2012, V. 12, № 4, ES4002.
- 4. Rudenko Yu.K., Vinnichenko N.A., Plaksina Yu.Yu., Pushtaev A.V., Uvarov A.V. Horizontal convective flow from a line heat source located at the liquid–gas interface in presence of surface film // Journal of Fluid Mechanics, 2022, V. 944, A35.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ КОЭФФИЦИЕНТА МАССООТДАЧИ КАМЕННОЙ СОЛИ ПО ВЫСОТЕ ПОДЗЕМНОЙ ВЫРАБОТКИ-ЕМКОСТИ

В.П. Малюков

Российский университет дружбы народов, Москва

<u>v.malyukov@mail.ru</u>

Коэффициент массоотдачи каменной соли является основным показателем процесса, который предопределяет технологические характеристики строительства подземной выработки-емкости при подаче раствора через буровую скважину [1,2].

Среднее значение коэффициента массоотдачи вертикальной поверхности каменной соли для всего интервала заложения подземной выработки-емкости по скважине 1Р Романовской площади Калининградского подземного хранилища газа (ПХГ) составило $\overline{K} = 0,01545\cdot10-5$ м/с, а по скважине 2Р – $\overline{K} = 0,01622\cdot10-5$ м/с. Значения коэффициента массоотдачи вертикальной поверхности каменной соли по керну Романовской площади представлены в таблице 1.

Анализ геологических разрезов показал, что оптимальными интервалами каменной соли мощностью 120 м для размещения выработок подземного хранилища природного газа по скважине 1Р является глубина 902-1022 м, а по скважине 2Р - глубина 898-1018 м [3].

По обеим скважинам изменение величины коэффициента массоотдачи по глубине интервала заложения выработки-емкости чередуется «волнообразно». На скважинах 1Р и 2Р в интервале заложения выработок умещается 5 таких «волн» величиной 24 - 25 м.

Волновое изменение величины коэффициента массоотдачи – это чередование снижения и возрастания величины коэффициента массоотдачи по высоте ПВЕ.

На отдельных образцах в процессе растворения каменной соли отмечено выделение углеводородного газа из пропластков и на контакте кристаллов соли. Объем выделившегося газа незначителен [6].

Экспериментальное определение коэффициента массоотдачи каменной соли выполнено на образцах из интервала подземных выработок-емкостей Гомельского ПХГ (Александровская площадь).

Среднее значение коэффициента массоотдачи по скважине 1Р составило $\overline{K} = 0,0163 \cdot 10^{-5}$ м/с, а по скважине 2Р (интервал 1295 - 1400 м) – $\overline{K} = 0,0183 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Отклонение максимальной величины от минимальной для коэффициента массоотдачи каменной соли различных интервалов по высоте подземной выработки-емкости на скважине 1Р составляет 54%, а по скважине 2Р – 40%.

По обеим скважинам изменение величины коэффициента массоотдачи по глубине чередуется «волнообразно». Интервал для обеих скважин, включающий уменьшение и увеличение коэффициента массоотдачи равен в среднем 49 м (длина волны).

На отдельных образцах в процессе массоотдачи каменной соли отмечено выделение газа из пропластков (углеводородный газ), из трещин и на контакте кристаллов (из одного образца выделялся сероводород). Объем выделившегося газа незначителен. Впервые отмечено выделение из каменной соли в интервале заложения подземной выработки в процессе массоотдачи двух разных газов.

Получено волновое распределение величины коэффициента массоотдачи каменной соли при массоотдаче по высоте интервала заложения подземных выработок Калининградского и Гомельского ПХГ [7,8,9].

В результате проведенных исследований определено волновое распределение изменения величины коэффициента массоотдачи для пластовых месторождений каменной соли в интервале строительства ПХГ. Определено характерное для рассматриваемых месторождений каменной соли изменение величины коэффициента массоотдачи – длина волны (одно снижение и возрастание величины коэффициента массоотдачи по высоте ПВЕ). Длина волны для Романовской площади 24-25 м, для Александровской площади – 49 м.

Литература/References:

1 Малюков В.П. Массоотдача и отрыв пограничного слоя при воздействии водного раствора на каменную соль. Процессы в геосредах. М.: ООО «Кватернион» Москва, 2020. №4 (26)

2 Малюков В.П. Локальные массопереносы при создании и эксплуатации подземной выработки в каменной соли. Процессы в геосредах. 2022. № 1 (31). С. 1482-1490.

3 Эдиашвили Н.А., Бутковский Ю.М., Сохранский В.Б., Панов В.Д. Калининградский соленосный бассейн как природная среда для размещения подземных хранилищ газа // Горный журнал. 2010. №3. С. 35-37.

ON STABILITY OF INVERSE PROBLEM SOLUTION FOR ROCK MASS STRESS STATE RECONSTRUCTION BASED ON NATURAL FRACTURES ANALYSIS

E.V. Novikova ^{1,2,3}, N.V. Dubinya ^{2,3}

¹Sadovsky Institute of Geospheres Dynamics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, helenvn97@gmail.com

² Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,

Dubinya.NV@gmail.com

³ Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, Russia

The study is devoted to development of specific method for estimation of in-situ stress state of rock masses based on natural fractures analysis. This approach has been under development recently: both field data [1 - 3] and theoretical research [4] suggest that behavior of natural shear fractures in rock can be studied in a way to evaluate magnitudes of principal in-situ stresses [1 - 2, 4] and their directions [3]. As the method is relatively novel, certain methodological aspects still deserve additional analysis. Current research is devoted to the problem of stability of inverse problem of stress estimation solution and its sensitivity to noise in input data. Synthetic data are used to deal with detailed stress reconstruction procedure to provide a certain 'true' solution for comparison.

The main idea behind stress reconstruction based on natural fractures analysis is based on critically stressed fractures concept [5]. According to this concept, there is a positive correlation between hydraulic conductivity of a natural shear fractures in rock mass and ratio between tangential and normal stress acting on its surface. Initially this concept was used to claim that whenever shear stress on fracture plane exceeds normal stress multiplied by friction coefficient, the fracture should be considered as hydraulically conductive (it is called 'critically stressed'), and vice versa. This statement was extensively studied to find that it remains generally true for rock masses that are not subjected to considerable thermodynamic processes, and stress state history is not excessively complex [6 - 9].

This concept can be used to formulate and solve the inverse problem of reconstructing in-situ stress state of rock mass based on data on hydraulic conductivity of natural shear fractures [1]. Knowledge of natural fractures hydraulic conductivity can be obtained from geophysical data, especially, from well logging data. Whenever hydraulic conductivity of natural fractures in well surrounding rock masses is evaluated from logging data, there is an opportunity to estimate in-situ stresses. Certain studies [1, 4] postulate this problem as follows: one has to introduce a set of parameters that govern in-situ stresses distributions in rock mass and find its values corresponding to the best match between hydraulically conductive and critically stressed fractures. This problem is proved to be ill-posed [4] as there can exist multiple solutions sensitive to error in input data. Initial studies [1 - 2, 4] analyzed simplified model of insitu stresses: one of stress tensor principal axes was set to be vertical. Nevertheless, critically stressed fractures can be successfully studied without this assumption, and such analysis does not involve serious complexity, as there exists an analytical solution to critically stressed fractures problem for an arbitrary stress tensor [10]. Thus, there is an opportunity to simultaneously reconstruct all components of stress tensor via using specific stress tensor parametrization. It has been successfully applied on field data [3], but parametrical study of inverse problem solution sensitivity and stability has not been performed for the case of an arbitrary stress state - current study is devoted to this problem.

We construct a synthetic natural fracture model to study these issues of inverse problem solution. Synthetic fracture model suggests that there are many fractures in a rock mass in stress state where all stress tensor components ratios to minimum principal stress magnitude remain constant. This corresponds to the case of homogeneous rock mass not subjected to point loads. Natural fractures spatial orientations are set to obey to uniform distribution. A certain 'true' stress state is set to determine hydraulic conductivity of natural fractures. Hydraulic conductivity is considered to be linearly correlated with ratio between shear and normal stresses on each fracture plane in qualitative accordance to field data and special experiments [5 - 9]. Fig. 1(a) presents the distribution of this ratio on a lower hemisphere Lambert azimuthal equal-area projection (stereonet). Gradient shows the ratio and three dots represent directions of principal stresses: red dot stands for direction of maximum principal stress, yellow is for intermediate principal stress, green is for minimum principal stress.

Fig. 1(b) shows the same ratio for artificially worsened data: certain noise level is introduced to change stress ratio at each fracture. This noise simulates both possible mistakes in natural fracture characterization while geophysical data interpretation and violations of linear relationship between hydraulic conductivity and stress ratio.

Stress state is defined through five independent parameters: three Euler angles governing directions of principal stresses, Lode-Nadai coefficient, and ratio between maximum and minimum principal stress. The sixth independent parameter for stress tensor cannot be evaluated in the postulated inverse problem: linearity of shear and normal stresses calculation procedures accompanied by linear correlation between hydraulic conductivity and shear to normal stress ratio leads to all stress tensors with all components multiplied by arbitrary real constant being equivalent in terms of inverse problem solution. Monte-Carlo simulation is performed to find set of parameters that provides the best match between hydraulic conductivity and shear to normal stress ratio for all fractures. Multiple sets of input data are used for analysis for varying level of noise to find the sensitivity of inverse problem solution to error in input data. Fig. 2 visualizes the increase in generalized distance between obtained solution of inverse problem and 'true' solution.



Figure 1. (a) Initial synthetic fracture model. (b) Synthetic model with artificial noise



Figure 2. Growth in generalized error D of inverse problem solution with increasing noise level L.

It can be seen that solution is indeed sensitive to error in input data. Detailed analysis suggests that typical mistakes in inverse problem solution are between 10 and 20 degrees in principal stresses directions reconstruction, and between 0.1 and 0.3 for dimensionless Lode-Nadai coefficient and ratio between maximum and minimum principal stress.

The obtained results provide basis for characterizing possibilities to estimate in-situ stresses in rock mass based on analysis of natural fractures hydraulic conductivity. This approach can be successfully implemented in practice if characterization of natural fractures conductivity is completed reliably with typical errors in hydraulic conductivity do not exceed approximately 20% of conductivity absolute value.

This requirement is in agreement with typical quality of well logging data analysis, so natural fractures analysis can be successfully used as an alternative method of estimating in-situ stresses in naturally fractured rock masses.

The study was funded by IPE RAS state order. The authors are grateful to Dr. I. Bayuk for her suggestions on the m

Литература/References:

- 1. Ito, T., Fujii, R., Evans, K. F. & Hayashi, K., 2002. Estimation of Stress Profile with Depth from Analysis of Temperature and Fracture Orientation Logs in a 3.6 km Deep Well at Soultz, France. SPE/ISRM Rock Mech. Conf. proc. 78185-MS.
- 2. Dubinya, N. V. & Ezhov, K. A., 2017. In-situ horizontal stress estimation based on the geometrical properties of fractures in well vicinity. Geophys. Res. 18(2): 5-26.
- 3. Zhang, S., Ma, X. & Zoback, M., 2023. Determination of the crustal friction and state of stress in deep boreholes using hydrologic indicators. Rock Mech. Bull. 2(1): 100024.
- 4. Dubinya, N. V. & Tikhotskiy, S. A., 2022. Method for the inverse problem solution for reconstruction of stress-strain state of rock mass based on natural fractures data. Izv. Phys. Sol. Earth. 58(4): 113-134.
- 5. Barton, C. A., Zoback, M. D. & Moos, D., 1995. Fluid flow along potentially active faults in crystalline rocks. Geol. 23(8): 683-686.
- 6. Fisher, Q. J. & Knipe, R. J., 1998. Fault sealing processes in siliciclastic sediments. Geol. Soc. London Spec. Publ. 147(1): 117-134.
- 7. Townend, J. & Zoback, M. D., 2000. How faulting keeps the crust strong. Geol. 28(5): 399-402.
- 8. Rogers, S., 2002. Critical stress-related permeability in fractured rocks. Fracture and in situ stress characterization of hydrocarbon reservoirs. Geol. Soc. London Spec. Publ. 209: 7-16.
- 9. Sathar, S., Reeves, H. J., Cuss, R. J., Harrington, J. F., 2012. The role of stress history on the flow of fluids through fractures. Min. Mag. 76(8): 3165-3177.
- Dubinya, N. V., 2022. Spatial orientations of hydraulically conductive shear natural fractures for an arbitrary stress state: An analytical study of governing geomechanical factors. J. Petrol. Sci. Eng. 212: 110288.

АНАЛИЗ АВТОМОДЕЛЬНОСТИ ДЕФЕКТА ПРОФИЛЯ СКОРОСТИ ВЕТРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ УРАГАНА ИРМА

Е.И. Поплавский, А.М. Кузнецова, Троицкая Ю.И. Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, 603950, Россия, e-mail: poplavsky7@gmail.com

Такие опасные морские погодные явления как тропические циклоны, внетропические проникновения в область более высоких широт, полярные ураганы в арктической зоне характеризуются высокими скоростями ветра и вызывают сильные дожди, штормы и штормовые нагоны. Данные погодные явления могут приводить к человеческим жертвам и наносят катастрофический ущерб прибрежной инфраструктуре, промышленности, транспорту и вызывают многомиллионные убытки. С этим связаны высокие требования к качеству прогнозирования и мониторинга подобных явлений.

Для восстановления, например, приповерхностной скорости ветра по спутниковым радиолокационным данным используются эмпирические геофизические модельные функции (ГМФ), связывающие характеристики излучения, рассеянного морской поверхностью, и скорость ветра [1, 2]. Для разработки ГМФ необходимы данные натурных измерений, в качестве которых большой популярностью пользуются измерения с GPS-зондов, сбрасываемых над ураганами. GPS-зонды являются чуть ли не единственным контактным методом измерения ветра в таких суровых погодных условиях. Однако, существует проблема определения приповерхностной скорости ветра

в экстремальных штормовых условиях данным инструментом в связи с большими погрешностями измерений вблизи поверхности. В работе [3] для обработки данных GPS-зондов авторами был предложен метод, основанный на автомодельности дефекта скорости ветра в пограничном слое урагана и позволяющий определить параметры атмосферного пограничного слоя, в том числе и приповерхностную скорость ветра, по измерениям в верхней его части. Согласно [4], для турбулентного пограничного слоя на плоской пластине или в трубе справедливо следующее приближение автомодельного профиля скорости:

$$U_{\max} - U(z) = \begin{cases} u_* \left(-\frac{1}{\kappa} \ln(z/\delta) + \gamma \right); z/\delta < 0.3 \\ \beta u_* \left(1 - z/\delta \right)^2; z/\delta > 0.3 \end{cases}$$
(1)

где U_{max} - максимальная скорость максимальная скорость в турбулентном пограничном слое, u_* – динамическая скорость, δ – толщина пограничного слоя, $\kappa = 0.4$ – постоянная Кармана, γ , β – константы, которые определяются по всем автомодельным профилям скорости ветра с использованных в работе [3] GPS-зондов.

В настоящей работе предложенный метод восстановления скорости ветра был использован для сравнения с расчетами атмосферной моделью Weather Research & Forecasting (WRF) [5] для случая урагана Ирма (развивался в период 30 августа 2017 - 12 сентября 2017 в Атлантическом океане). Подготовка данных для моделирования урагана проводилась в системе WRF Preprocessing System (WPS). Были проведены расчеты для четырех вложенных доменов в области прохождения урагана. Размер ячейки третьего вложенного домена составлял ~ 3,3 км, четвертого ~ 1,1 км (Рис. 1).



Рисунок 1. Расположение вложенных доменов в расчетах атмосферной модели WRF

Схемы параметризации представляют собой физические процессы, которые не разрешены моделью WRF. Был произведен анализ чувствительности модели к применению разных параметризаций и оценка влияния их использования на траекторию урагана, его форму и интенсивность. Оказалось, что наилучшим образом подходит конфигурация, состоящая из параметризации YSU для ППС, Revised MM5 в качестве варианта поверхностного слоя, WRF Single-moment 6-class для микрофизики, Kain-Fritsch scheme для конвекции и RRTMG для параметризации длинноволновой и коротковолновой радиации.

Для представленного в работе [3] метода профилирования, основанного на автомодельности профилей скорости ветра в урагане, предполагается, что эта автомодельность одинаковая для всего урагана. Используя полученные результаты моделирования, можно проанализировать как выполняется автомодельность и одинакова ли она в разных секторах урагана.

Для получения констант γ и β (1) необходимо построить профили скорости ветра, полученные в результате расчета, в безразмерных переменных (Рис. 2).



Рисунок 2. Профили скорости ветра из расчета урагана Ирма в автомодельных переменных. Красная линия – логарифмическая аппроксимация нижней части пограничного слоя ($\frac{z}{\delta} < 0.3$), синяя – полиномиальная аппроксимация ($\frac{z}{\delta} > 0.3$)

Как видно из графика, профили действительно группируются с неким разбросом вокруг одной кривой, которая состоит из логарифмической и параболической части.

В работе [6] в ураганах выделяется три сектора, основываясь на наблюдении в них разного волнения. Следует предположить, что и вид автомодельных зависимостей в разных частях урагана может отличаться. Используя такое же разбиение урагана по трем секторам, можно построить для каждого из них отдельные автомодельные зависимости и сравнить полученные коэффициенты β (или, по сути, наклоны логарифмической части). Разбиение урагана на сектора осуществлялось следующим образом (Рис. 3): от направления движения урагана первый сектор лежал в области 20-150 градусов, второй – 150-240 градусов, а оставшаяся область была третьим сектором.



Рисунок 3. Секторальное разбиение урагана в соответствии с [6], стрелкой указано направление движения урагана

В результате были получены следующие значения для коэффициента β : 10.09 +/- 0.225 (1 сектор), 9.80 +/- 0.35 (2 сектор), 12.89 +/- 0.46 (3 сектор) (Рис. 4). Как видно из данных значений,

выделяется коэффициент β для 3 сектора, тогда как коэффициенты для 1 и 2-го секторов примерно одинаковы в пределах доверительных интервалов.



Рисунок 4. Автомодельные профили скорости ветра для 1 сектора (а), для 2-го (б), для 3-го (в). Красная линия – логарифмическая аппроксимация нижней части пограничного слоя (до 0.3 $\frac{z}{\delta}$)

Для исследования поведения этих секторальных автомодельных зависимостей от расстояния было произведено разбиение данных на бины по 10 км по расстоянию от центра урагана, начиная с 40 км, где начинается стена глаза урагана с высокими скоростями ветра, и по данным каждого бина были построены автомодельные зависимости. На Рис. 5 продемонстрированы полученные результаты, а именно зависимости коэффициента β от расстояния до центра урагана для каждого сектора. Зависимости для 1-го и 2-го сектора ведут себя похожим образом практически на всем исследуемом участке, за исключением диапазона 62.5 – 67.5 км, где между ними наблюдается небольшое различие. Зависимость для 3-го сектора довольно существенно отличается от двух других вне пределов доверительных интервалов на расстояниях от 47.5 км до 72.5 км. Следует отметить, что в работе [6] были рассмотрены зависимости коэффициента аэродинамического сопротивления от скорости ветра для данных секторов и зависимость для переднего левого сектора также заметно выделялась на фоне остальных, что связано с разным волнением в данных секторах. В данном случае различие коэффициента β может быть связано с разным поведением

профилей скорости ветра в верхней параболической части атмосферного пограничного слоя. Ветер в тропическом циклоне вращается по спирали вокруг его центра против часовой стрелки в Северном полушарии, и как раз в левом переднем секторе поступательное движение урагана и направление вращающегося ветра противоположны, и можно предположить, что это, повидимому, оказывает большое влияние на вихревую структуру атмосферного пограничного слоя для данного сектора, в отличии от остальных. Из-за разной вихревой структуры различаются и профили скорости ветра, что, в свою очередь, и проявляется в различии автомодельных зависимостей. Похожая ситуация наблюдалась в работе [4], но для турбулентного потока в трубе, где для разных вихревых структур были получены разные коэффициенты β .



Рисунок 5. Зависимость коэффициента β от расстояния до центра урагана для трех его секторов. Черная кривая – 1-й сектор, синяя – 2-й, красная – 3-й

Произведенная оценка коэффициентов β свидетельствует о том, что автомодельные законы несколько различаются в зависимости от сектора урагана на определенных расстояниях до его центра, и этот факт было бы полезно учитывать в будущем при восстановлении геофизических параметров, если для этого имеется достаточное количество экспериментальных данных, используемых для этого восстановления.

Работа поддержана грантом МК-2489.2022.1.5.

Литература/References:

- 1. Hersbach, H. Comparison of C-Band Scatterometer CMOD5.N Equivalent Neutral Winds with ECMWF. J. Atmos. Ocean. Technol. 2010, 27, 721–736.
- Stoffelen, A.; Verspeek, J.A.; Vogelzang, J.; Verhoef, A. The CMOD7 Geophysical Model Function for ASCAT and ERS Wind Retrievals. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens. 2017, 10(5), 2123-2134.
- 3. Y. Troitskaya, O. Ermakova, N. Rusakov, E. Poplavsky, D. Sergeev and G. Balandina, 2019. Towards the GMF for Wind Speed and Surface Stress Retrieval in Hurricanes Based on the Collocated Dropsonde Data and Cross-Polarization SAR Images. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 4693-4696
- 4. Hintze, J.O. Turbulence: An Introduction to Its Mechanism and Theory; McGraw-Hill: New York, NY, USA, 1959; p. 586.

- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Duda M. G., Huang X-Y, Wang W., and Powers J. G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- 6. Holthuijsen, L.H.; Powell, M.D.; Pietrzak, J.D. Wind and waves in extreme hurricanes. J. Geophys. Res. 2012, 117, C09003.

ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ АНДЕЗИБАЗАЛЬТОВ В УСЛОВИЯХ СЕРНОКИСЛОТНОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

И.Е. Большаков, М.А. Никулина

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Геологический факультет, Москва,

Россия

bolshakov.ilya.210@yandex.ru

1.Введение

В современно мире в связи с постоянным повышением интереса к альтернативным источникам энергии все чаще встает вопрос эксплуатации геотермальных месторождений. огромные промышленные Гидротермальные системы содержат запасы пара и высокотемпературных вод, которые служат основой для развития геотермальных электростанции, тепличных хозяйств, систем теплоснабжения. ГеоТЭС чаще всего располагают в районах с широко развитыми поверхностными разгрузками термальных вод и пара, таким образом, основаниями для самих станций и сопутствующих сооружений служат именно гидротермально измененные породы [1]. Кроме того, известно, что гидротермальный метаморфизм, может способствовать активизации опасных геологических процессов. Объектом исследования данной работы являются андезибазальты Южно-Камбального Центрального термального поля. Цель работы - изучить особенности изменения состава и свойств андезибазальтов исследуемого поля в условиях сернокислотного выщелачивания как на примере измененных в естественных условиях образцов, так и образцов, подвергшихся сернокислотному выщелачиванию в процессе лабораторного эксперимента.

2. Методика исследования

2.1Схема отбора образцов.

В ходе полевых работ в районе Паужетской гидротермальной системы на Южно-Камбальном Центральном термальном поле в 2022 году были отобраны 4 образца андезибазальтов различной степени опализированности: неизмененный, слабоизмененный, среднеизмененный, опалит. Отбор производился в северной уже остывшей части поля из трех неглубоких выработок глубиной до 80 см. Участок отбора находился приблизительно в 50 м от прогретой части поля.

2.2Лабораторные исследования.

Из образцов в общей сложности было изготовлено 54 цилиндрические пробы. Для всех проб были определены следующие показатели физических и физико-механических свойств грунтов: плотность твердой компоненты (ρ_s) с помощью прибора В. Я. Калачева, скорость распространения продольных (V_p) и поперечных (V_s) волн в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии, магнитная восприимчивость (χ_{cp}), рассчитаны плотность воздушно-сухого грунта (ρ), динамический модуль упругости ($E_{дин}$) и коэффициент Пуассона (μ), прочность на одноосное сжатие в сухом (R_c) и водонасыщенном (R_{cB}) состоянии, прочность на растяжение в сухом и водонасыщенном состоянии (R_p), коэффициент размягчаемости ($K_{разм}$), степень водопоглощения (Wn, %), общая (n) и открытая пористость(n_o ,%). Все определения проводились по стандартным методикам [2]. Параллельно с определением свойств были изучены особенности пустотного пространства с использованием микротомографа Yamato TDM-1000, все образцы описаны в шлифах с помощью оптического микроскопа «Olympus BX-41», определён минеральный состав посредством рентгенодифракционного анализа (прибор Ultima-IV). Для исследования свойств образцов, измененных в лабораторных условиях, была выполнена серия экспериментов, приближенная к условиям сернокислотного выщелачивания на ислл термальном поле. На образцах неизмененного андезибазальта проведены 16 лабораторных экспериментов: пробы, были термически обработаны в 10 % растворе серной кислоты при температурах 20 °C, 50 °C, 100°C, 170°C в течение 1, 3, 7 и 14 суток. Для лабораторно преобразованных проб определены те же самые характеристики, что и для натурных, а также рассчитано количество кислоты, прореагировавшее в ходе реакции.

3.Петрографическая характеристика

В образцах, преобразованных в природных условиях, с увеличением степени изменения наблюдается развитие трещиноватости, усложняется конфигурация трещин, характерно втричное минералообразование (опал, кристобалит), многие вкрапленники замещаются другими минералами, а на конечной стадии (опалит) изменения все вещество основной массы оказывается полностью представлено опалом и небольшим количеством серы. Похожим образом происходят изменения на микроуровне и для лабораторно изменённых проб, термически обработанных в течение 14 суток при различной температуре. Изменения, возникшие в пробах в результате термической обработки в модельном растворе, можно было наблюдать на макроскопическом уровне, и в целом они соответствуют тем, которые можно наблюдать в природных условиях. Порода становится более трещиноватой, отчасти крошащейся, зерна в большей степени замещаются опалом с увеличением степени обработки.

Для более детального понимания последовательности и результатов минералогических преобразований в процессе экспериментальной опализации был подготовлен ряд шлифов (рисунок 1) из образца неизмененного андезибазальта, а также образцов, подвергшихся обработке при 20, 50 и 170 градусах. При этом шлифы были подготовлены из образцов в форме пластин, которые были подвергнуты абсолютно идентичной обработке, как и цилиндры при соответствующих температурах в течение 9 дней.



Рисунок 1. Образцы андезибазальтов в различной степени подверженных экспериментальной опализации под микроскопом в одном (справа) и двух (слева) николях

Исходя из информации, полученной при помощи изучения шлифов в проходящем свете, можно утверждать, что механизм опализации, протекающий в описываемых образцах практически полностью идентичен механизму, наблюдаемому на реальных термальных полях, характеризующихся разгрузкой ультракислых термальных вод. Так, в начале сернокислотному выщелачиванию оказываются подвержены центральные части крупных вкрапленников и вулканическое стекло основной массы, а далее опализация развивается по периферийным частям крупных вкрапленников и микролитам, которые имеют более кислый состав.

Дополнительно необходимо отметить, что в связи с ограниченностью времени воздействия и объема взаимодействующего раствора (ввиду протекания эксперимента в закрытой системе) опализация развивается не равномерно по всему объему образца, а согласно основным принципам диффузионного взаимодействия твердых веществ и жидкостей. То есть в периферийной части изменения гораздо значительнее, чем внутри образцов.

4.Изменения физических и физико-механических свойств андезибазальтов

Пробы натурно преобразованных андезибазальтов отличаются по своим свойствам в зависимости от степени изменения (от неизмененных андезибазальтов к серным опалитам). С увеличением степени изменения уменьшается значение плотности наибольшую имеют неизмененные образцы (2,64 г/см³), наименьшую - опалиты (1,35 г/см³). Скорости продольных и поперечных волн в целом уменьшаются с увеличением степени преобразования (V_p =4,68 - 3,58-2,56 - 1,10 км/с), (V_s= 2,10- 1,86 - 1,26- 0,61 км/с). Также уменьшался и динамический модуль упругости, пределы прочности на сжатие и растяжение в сухом и водонасыщенном состоянии, магнитная восприимчивость, но при этом увеличивалась пористость. По коэффициенту размягчаемости неизмененные(K_{sof}=0,71), среднеизмененные андезибазальты (K_{sof}=0,62) и опалиты (K_{sof}=0,98).

Для образцов, подвергшихся сернокислотному выщелачиванию в лабораторных условиях, помимо данных об изменении строения был получен и ряд показателей, демонстрирующих процесс изменения свойств образцов по мере протекания процесса опализации (рисунок 2). Так, для всех образцов до и после воздействия раствора кислоты определялся весь стандартный набор показателей свойств горных пород. Закономерным образом, единственный показатель, который для всех цилиндров определялся только один раз была прочность на одноосное сжатие, однако, 4 контрольных образца, которые не подвергались экспериментальной опализации были разрушены в неизмененном виде и показали достаточно близкие значения, таким образом, для всех остальных образцов это значение было принято за исходную величину прочности на одноосное сжатие.

Из приведенных на рисунке 2 графиков отчетливо видно, что изменения свойств пород хорошо коррелируют с длительностью обработки. Наиболее отчетливые зависимости были получены для показателей уменьшения плотности и уменьшения магнитной восприимчивости, измеряющихся в процентах и определяемых как отношение разницы показателя до и после реакции к изначальной величине (снижение плотности = ($\rho_{\text{неизм}}$ - $\rho_{\text{изм}}$)/ $\rho_{\text{неизм}}$). Из этих двух графиков видно, что скорость изменения свойств снижается со временем, что связано в основном с ростом диффузного слоя, замедляющего протекание реакции. С другой стороны, отчетливо видно, что скорость изменения свойств зависит от температуры. Например, за одинаковый промежуток времени при температуре 20°C величина снижения плотности меньше приблизительно в 3,5 раза, чем при температуре 50°C.



Рисунок 2. Изменение свойств в зависимости от длительности и температуры опализации

Для того, чтобы нивелировать недостатки экспериментов в закрытой системе были измерены водородные показатели исходного раствора серной кислоты и всех образованных в результате протекания реакции растворов. Основываясь на полученных данных, был составлен ряд графиков, отражающих зависимость изменения свойств образцов от количества прореагировавшей кислоты (рисунок 3). Из них отчетливо видно, что на наблюдаемом участке изменения присутствует прямая корреляция изменения физических, физико-механических и магнитных свойств с количеством прореагировавшей кислоты.



Рисунок 3. Изменение свойств андезибазальтов в зависимости от количества прореагировавшей H2SO4 отнесенной к объему образиа

Как и в зависимости от длительности обработки, в зависимости от количества прореагировавшей серной кислоты, отнесенной к объему образца, снижение плотности и магнитной восприимчивости демонстрируют весьма закономерную взаимосвязь, что, вероятно, объясняется в основном прямой химической природой изменения этих показателей при изменении минерального состава. Коэффициенты детерминации на наблюдаемом участке для выявленной линейной зависимости составляют 0,96 и 0,93 для снижения плотности и снижения магнитной восприимчивости соответственно.

5.Заключение.

Таким образом, в результате исследования была дана оценка характеру изменения состава и свойств андезибазальтов в условиях сернокислотного выщелачивания. Общие тенденции изменения свойств совпадают как для проб, измененных натурно, так и для лабораторно

измененных проб. С увеличением степени изменения происходит образование новых минералов, уменьшение количества рудных компонентов, развитие пустотности, появление в значительной степени аморфного вещества на конечных стадиях. Изменение свойств в условиях лабораторного эксперимента коррелирует со временем обработки и с количеством прореагировавшей кислоты – чем больше длительность и температура обработки, тем в большей степени происходит уменьшение значений свойств, в частности массы, плотности, магнитной восприимчивости. Зависимость уменьшения соответствующих характеристик от длительности эксперимента носит логарифмический характер, от количества прореагировавшей кислоты практически линейный.

Литература/References:

1. Белоусов В.И., Сугробов В.М., Сугробова Н.Г. Геологическое строение и гидрогеологические особенности Паужетской гидротермальной системы. Сб. «Гидротермальные системы и термальные поля Камчатки». Владивосток. 1976. С. 23-57.

2. Фролова Ю.В. Скальные грунты и методы их лабораторного изучения: учебное пособие/ Ю.В. Фролова - Москва: Книжный дом Университет, 2015. - 220 с.

УПРУГОПЛАСТИЧЕКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОРОД-КОЛЛЕКТОРОВ В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОГО ТРЕХОСНОГО НАГРУЖЕНИЯ

А.Ю.Зобнина

Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия E-mail: nastyadvolkova@gmail.com

Учет влияния геомеханических процессов на эффективность и безопасность разработки и эксплуатации месторождения, как правило, производится путем построения его геомеханической модели. Такие модели направлены на решение двух главных вопросов. Первый – как распределяются напряжения в окрестности ствола скважины при проведении различных технологических операций на скважине. Моделирование распределения полей напряжений проводится аналитически или численно. Параметры модели – деформационные и прочностные характеристики могут быть определены путем испытаний образцов изучаемых горных пород на установке истинно трехосного нагружения. Второй вопрос связан с влиянием полей напряжений на процессы фильтрации.

Целью данной работы является определение деформационных и прочностных свойств породы, физическое моделирование процессов деформирования, разрушения и фильтрации в окрестности горизонтальной скважины, а также исследование влияния напряженнодеформированного состояния на фильтрационные свойства пород шельфового нефтяного месторождения.

Методика исследования

Трехосные испытания образцов

Образцы породы шельфового нефтяного месторождения на установке ИПМех РАН Испытательная система трехосного независимого нагружения подвергались одноосному нагружению и разгрузке на фоне разного уровня всестороннего обжатия - при 2 МПа, 10 МПа, 20 МПа. Программы нагружения для первого и второго цикла представлены на рис.1. По кривым деформирования определялись деформационные характеристики породы. Объемные прочностные характеристики определялись на основе построения кругов Мора для каждого цикла нагружения.



Рис.1 Трехосные испытания образиов: Программы нагружения.

Физическое моделирование механических процессов в окрестности скважины при увеличении депрессии

В данной серии испытаний моделировались напряжения, возникающие на стенке необсаженной горизонтальной скважины. Схематически эти напряжения представлены на рис. 2.



Рис 2. Напряжения в окрестности горизонтальной необсаженной скважины.

Для определения напряжений в окрестности горизонтальной скважины, пробуренной в слабо трансверсально изотропной породе, можно с хорошей точностью пользоваться решениями для скважины в упругой изотропной среде. Также учитывая, что за геологические временны начальные напряжения в массиве выровнялись по всем направлениям, программа нагружения образцов может быть построена на известном решении задачи Ламе о напряжениях, возникающих в толстостенном цилиндре, находящимся под действием всестороннего равномерного сжатия внешним давлением и внутренним давлением заполняющей ее жидкости [1].

Программа нагружения представлена на рис.3.



Рис.3 Физическое моделирование: Программа нагружения.

Результаты

На основе анализа результатов трехосных испытаний образцов из пород-коллекторов месторождения им. В.Филановского были рассчитаны упругие характеристики пород для каждого цикла нагружения образцов - касательный модуль Юнга Е и коэффициенты Пуассона и по осям 1 и 3 образца перпендикулярно оси керна, а также усредненный коэффициент Пуассона. Помимо упругих характеристик из данных трехосных испытаний образцов были определены прочностные характеристики исследованных пород для двух критериев разрушения или перехода в пластическое состояние - критериев Кулона-Мора и Друкера-Прагера.

| | Обжатие | E *10 ⁻³ | V_1 | V_3 | V | S_2^* | К | ho град | Друкер- | Прагер |
|------|---------|---------------------|-------|-------|------|---------|-----|---------|---------|--------|
| Цикл | МПа | МПа | 1 | 5 | | MΠấ | ΜПа | , - | A | B |
| 1 | 2 | 5,03 | 0,26 | 0,28 | 0.27 | 46 | 11 | 31 | 14,9 | 0,23 |
| 2 | 10 | 8,55 | 0,23 | 0,17 | 0,20 | 73 | | | | |
| 3 | 20 | 11,32 | 0,15 | 0,18 | 0,17 | 103 | | | | |

Образец № Ф4-ПсА-7-1 (1405,7 м)

Образец № Ф4-П-9-1 (1412,7 м)

| | Обжатие | E *10 ⁻³ | V_1 | V_3 | V | S_2^* | К | ho град | Друкер- | Прагер |
|------|---------|---------------------|-------|-------|------|---------|-----|---------|---------|--------|
| Цикл | МПа | МПа | 1 | 5 | | MΠấ | МΠа | , - | A | B |
| 1 | 2 | 5,46 | 0,22 | 0,22 | 0.22 | 51 | 14 | 28 | 20,5 | 0,18 |
| 2 | 10 | 9,67 | 0,18 | 0,24 | 0,21 | 76 | | | | |
| 3 | 20 | 11,50 | 0,15 | 0,20 | 0,18 | 100 | | | | |

Из приведенных результатов видно, что значения модуля Юнга и коэффициентов Пуассона зависят от величины предварительного всестороннего обжатия образцов – с ростом всестороннего предварительного обжатия величина модуля Юнга растет, а значение коэффициента Пуассона уменьшается. Это необходимо учитывать при расчетах.

На рис. 4 и 5 представлены результаты испытаний образцов по программам нагружения, соответствующим физическому моделированию напряжений в окрестности горизонтальной скважины [2].



Рис.4 Кривые деформирования образцов Ф2-ПсГ-5-1 (верх) и Ф2-ПсГ-5-2 (бок).



Рис.5 Изменение проницаемости образцов Ф2-ПсГ-5-1(верх) и Ф2-ПсГ-5-2 (бок).

Опыты показывают, что начало разрушения в первую очередь следует ожидать в верхних (нижних) точках контура скважины. Например, образец Ф2-ПсГ-5-2, на котором моделировались условия в боковой точке на контуре скважины (точка N), разрушился при нагрузке, соответствующей депрессии на забое скважины 6,1 МПа, а образец Ф2-ПсГ-5-1, на котором моделировались условия в верхней точке на контуре скважины (точка M) - при значительно меньшей депрессии 2,4 МПа. Надо заметить, что потери устойчивости ствола скважины при этом еще не произойдет. Для этого необходимо, чтобы состояние предельного равновесия возникло в достаточно большой области в окрестности скважины.

Работа выполнена в рамках государственного задания, регистрационный номер темы 123021700046-4.

Литература/References:

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1979. – 560 с.

2. Климов Д.М., Карев В.И., Коваленко Ю.Ф. Экспериментальное исследование влияния неравнокомпонентного трехосного напряженного состояния на проницаемость горных пород // Изв. РАН. МТТ. 2015. № 6. С. 39-48.

ТЕРМОАКУСТИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ДОБЫЧИ ВЫСОКОВЯЗКОЙ НЕФТИ

М.С. Муллакаев¹, Р.М. Муллакаев¹, Д.Г. Сарваров², А.А. Рухман³ 1РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина, г. Москва, Россия, mullakaev@mail.ru; r.m.mullakaev@mail.ru ²ООО «Энегро», г Екатеринбург, Россия, sarvarovdg@yandex.ru

³ ООО «Ультразвуковые генераторы", г. Москва, Россия, aruhman@yandex.ru

В настоящее время уделяется большое внимание освоению и вводу в промышленную разработку месторождений с высоковязкой нефтью. Причем запасы месторождений с нефтью вязкостью более 10 сП освоены у нас в стране всего на 10...30 %. Одним из эффективных методов воздействия на призабойную зону скважины (ПЗС) является акустическое воздействие, в частности в ультразвуковом (УЗ) диапазоне [1-3].

Механизм акустического воздействия на призабойную зону скважины. Анализ литературных и экспериментальных данных, модельных расчётов позволил выявить основные механизмы, ответственные за улучшение фильтрации нефти в пористых средах при акустическом воздействии на ПЗС:

– нелинейные акустические эффекты в порах (кавитация, акустические течения, звуковое давление) уменьшают действие капиллярных сил из-за разрушения поверхностных плёнок и увеличивают скорость фильтрации флюида [4, 5];

- нелинейные акустические эффекты способны разрушить как первичные (слоистопачечные ассоциаты), так вторичные надмолекулярные образования (мицеллы) в НДС, связанные слабыми ван-дер-ваальсовыми связями и, как следствие, значительно снизить вязкость флюида [1-5];

– уменьшаются поверхностное натяжение, плотность и вязкость флюида вследствие ультразвукового нагрева [6-8];

 – увеличивается относительная проницаемость фаз [7, 9];
 – происходит перистальтическое движение флюида вследствие механической вибрации стенок пор. посредством которого жидкость "сжимается" в соседние поры [10]:

– начинается микроэмульгирование нефти в присутствии природных или введённых поверхностно-активных веществ (ПАВ), повышается растворимость ПАВ и уменьшается его адсорбции [9, 11];

– происходит слияние капель масла из-за сил Бьеркнеса [12, 13];

- увеличиваются проницаемость горных пород и пористость из-за деформации пор, происходят очистка перфорационных каналов и пор коллектора от АСПО и других включений, уменьшение скин-эффекта [6];

- возникновение внутрипоровой конвекции приводит к изменению теплопроводности насыщенных флюидами сред, уменьшению скин-эффекта и, как следствие, повышению продуктивности скважин [6];

Термоакустический скважинный комплекс КСТА-2. Разработан термоакустический скважинный комплекс КСТА-2, предназначенный для комбинированной обработки ПЗС с высоковязкой нефтью комбинированным методом: ультразвукового (УЗ) и индукционного нагрева (ИН) и их комбинаций. Блок-схема комплекса приведена на рис. 1. Технические характеристики комплекса КСТА-2 приведены в табл.1

В состав комплекса КСТА-2 входят: автоматизированное рабочее место (АРМ), (ПК); приборы скважинные УЗ-модуль (УЗ-генератор, промышленный компьютер термоакустические ПСТА-42 и ПСТА-102); геофизический цифровой модуль (каротажный регистратор, геофизический скважинный прибор); согласующее устройство; геофизический кабель питания на барабане; комплект эксплуатационной документации (ЭД) и технологической документации по режимам обработки ПЗС (ТД); комплект ЗИП-О.



Рисунок 1. Блок-схема комплекса

| Таблица 1. | Технические хо | рактеристики | комплекса | KCTA-2 |
|------------|----------------|--------------|-----------|--------|
|------------|----------------|--------------|-----------|--------|

| Глубина обработки скважины, м | до 5000 |
|------------------------------------|-----------------|
| Мощность прибора при УЗО, кВт | 2 |
| Рабочая частота прибора, кГц | $19,0 \pm 0,5$ |
| Мощность прибора при нагреве, кВт | 5 |
| Рабочая температура прибора, °С, | не более 120 |
| Измеряемая температура, °С | от - 40 до +120 |
| Электропитание | 220/380 B, |
| _ | 50/60 Гц |
| Потребляемая от сети мощность, кВт | не более 10 |
| Габаритные размеры, мм, не более | |
| станция управления | 880 x490 x1060 |
| прибор ПСТА-42 | Ø 42 x 3480 |
| прибор ПСТА-102 | Ø 102 x 3480 |

Опытно-промысловые испытания технологии и комплекса.

Критерии подбора скважины-кандидата. Метод наиболее эффективен в терригенных коллекторах с пористостью 12...30 % и проницаемостью более 20 мД со снижением продуктивности более чем на 30 % за последние полгода-год. Эффективность снижается с ухудшением коллекторских свойств и увеличением вязкости нефти при кратковременном использовании. Также необходимо оценить карту разработки и возможные влияния соседних скважин. Критерии выбора скважин приведены в работах [12–16].

Регистрация параметров работы скважины до обработки с помощью геофизического модуля: а) спуск геофизического прибора и излучателя в интервал обработки; б) привязка геофизическим прибором; в) регистрация геофизических параметров в статическом режиме; г) оценка параметров работы скважины в динамическом режиме (создание и регистрация депрессии и дебита, регистрация профиля притока); д) оценка работающих интервалов, согласование интервалов обработки.

Ультразвуковая обработки ПСЗ: а) планирование режимных параметров работы (мощность и время УЗО, периодичность включения и др.) модулей ПСТА-42 и ПСТА-102 на основе анализа геофизических исследований и режима работы скважины; б) обработка заданных интервалов с необходимыми интенсивностью и временем согласно плану проведения ОПИ; в) регистрация дебита, замер депрессии при периодических отключениях УЗ-излучателей с помощью геофизического модуля.

Регистрация параметров работы скважины после УЗО с помощью геофизического модуля: а) оценка параметров работы скважины в динамическом режиме (создание и регистрация депрессии и дебита); б) регистрация профиля притока.

Работа с излучателем ПСТА-102. Спуск прибора осуществляют на НКТ в интервал обработки ПЗС, линия питания прокладывается снаружи НКТ. В зависимости от режима обработки ПЗС прибор ПСТА-102 может запитывать излучатель через автономную (съёмную) катушку с геофизическим кабелем или кабелем питания УЭЦН. Вызов притока осуществляется посредством струйного насоса или насосным оборудованием.

Результаты опытно-промысловых испытаний. ОПИ модуля ПСТА-102 проводились на скв. №31 Мордовоозерского месторождения в НГДУ "Нафта-Ульяновск нефть" (ОАО "Ульяновскнефть" – РуссНефть). До УЗО скважины добыча вязкой нефти велась по следующей технологии: промывка горячей нефтью с помощью агрегата депарафинизации скважин (АДП) 1 раз в 3 сут и закачка растворителя объёмом 20 м³ 1 раз в месяц.

Скважинный прибор ПСМС-102 был спущен на хвостовике под насос HB44 в интервал перфорации на постоянной основе. Питание осуществлялось через КПБП 3x10 (погружной кабель для УЭЦН). Проводилась обработка ПЗС в периодическом режиме: в течение 3 ч 1 раз в 3 сут. Расход электроэнергии составлял 10 кВт/ч. Результаты представлены в табл. 2.

| Скважина Пласт Насос $Q_{*}, M^3/сут$ $Y_{W}, \%$ $Q_{H}, T/сут$ $\mu, c\Pi$ $P_{3a6}, atm.$ | | | | | | | | | | |
|---|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| 31 C1bb HB44 23,1 8 9,7 4555 41,8 | | | | | | | | | | |
| где Q _ж – дебит жидкости, м ³ /сут; Q _н – дебит нефти, м ³ /сут; Y _w -обводненность, %; µ – вязкость | | | | | | | | | | |
| динамическая, сП; Р _{заб} – забойное давление, атм. | | | | | | | | | | |

Таблица 2. Результаты испытаний модуля МСУМ-102

Таким образом, используя УЗО скважины удалось отказаться от промывок горячей нефтью и закачки растворителя при сохранившемся дебите нефти.

Литература/References:

1. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.

2. Mullakaev M.S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. M.: HELRI, 2018. 376 p.

3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и переработки нефтешламов. М.: НИИ ИЭП, 2019. 412 с.

4. Дыбленко В.П. Волновые методы воздействия на нефтяные пласты с трудно-извлекаемыми запасами. Обзор и классификация. М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2008. 80 с.

5. Nikolaevskiy, V.N., 1989. Mechanism of vibration for oil recovery from reservoirs and dominant frequencies. Trans. USSR Acad. Sci. 307: 570–575.

6. Fairbanks H.V., Chen W.J., 1971. Ultrasonic acceleration of liquid flow through porous media. Chem. Engineering Progress. Symposium Series. 67: 108–116.

7. Mikhailov, D.N., Nikolaevskiy D.N., 2000. Dynamics of flow through porous media with unsteady phase permeabilities. Fluid Dyn. 35.

8. Aarts A.C.T., 1999. Enhancement of liquid fl ow through a porous medium by ultrasonic radiation. SPE J. 5: 321.

9. B Abismaïl, J.P. Canselier, A.M. Wilhelm, H. Delmas, C. Gourdon, 1999. Emulsification by ultrasound: drop size distribution and stability. Ultrason. Sonochem. 6: 75–83.

10. V.F.K. Bjerknes. Fields of force. New York: Columbia University Press, 1906.

11. Mettin, R., Akhatov, I., Parlitz, U., Ohl, C.D., Lauterborn, W., 1997. Bjerknes forces between small cavitation bubbles in a strong acoustic field. Phys. Rev. E. 56: 2924–2931.

12. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Prachkin V.G., 2015. Development of combined technology and the complex for intensification of oil production by means of ultrasound treatment. Chem. & Pet. Eng. 51: 237–242.

13. Abramov, V.O., Mullakaev, M.S, Abramova, A.V., Esipov, I.B., Mason, T.J., 2013. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implemention. Ultrason. Sonochem. 20: 1289–1295.

14. Mullakaev, M.S., Abramov, V.O., Abramova, A.V., 2015. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. J. Pet. Sci. Eng. 125: 201–208.

15. Mullakaev, M.S., Abramov, V.O., Abramova, A.V., 2017. Ultrasonic automated oil well complex and technology for increasing the productivity of marginal wells. J. Pet. Sci. Eng. 159: 1–7.

16. Mullakaev M.S., Abramov V.O., Abramova A.V., 2017. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. J. Pet. Sci. Eng. 158: 529–534.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ НА СКВАЖИНАХ САМОТЛОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ (ЗАПАДНАЯ СИБИРЬ)

М.С. Муллакаев¹, Ю.А. Салтыков², А.А. Салтыков², Р.М. Муллакаев¹ ¹РГУ нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина ²ООО "Илмасоник-Наука-Сервис"

Развитие сырьевой базы нефтяной промышленности РФ зависит не только от прироста объёмов разведанных запасов нефти, но и от освоения новых методов повышения коэффициента извлечения нефти (КИН). Большое число простаивающих скважин, рост доли залежей с тяжёлыми и вязкими нефтями, уменьшение дебитов скважин свидетельствуют о низкой эффективности применяемых технологий извлечения нефти [1, 2].

Согласно работам [3–5] метод акустического воздействия, в частности в ультразвуковом (УЗ) диапазоне, является одним из наиболее перспективных среди волновых методов увеличения дебита скважин. При этом эффективность метода можно существенно повысить за счёт разработки высокоэффективной аппаратуры, правильного подбора скважин-кандидатов и математического моделирования физических процессов, сопровождающих акустическое воздействие.

Результаты ультразвуковой обработки (УЗО). В период 2010–2012 гг. на Самотлорском месторождении была проведена УЗО обработка призабойной зоны пласта (ПЗП) на 68 нефтяных скважинах. В табл. 1 приведены результаты ОПИ УЗ-технологии обработки скважин с учетом геолого-физических характеристик пластов.
| Пласт | Число скважин | Успешность, % | Средний дебит нефти, т/сут | | Рост дебита, % |
|--------------------------------|------------------|------------------|----------------------------|-----------|----------------|
| | | | до УЗО | после УЗО | |
| AB_1^{1-2} | 12 | 92 | 3,04 | 6,65 | 219 |
| AB ₁ ⁽³⁾ | 9 | 100 | 2,48 | 3,9 | 157 |
| AB ₂₋₃ | 23 | 74 | 3,47 | 2,5 | 72 |
| AB ₄₋₅ | 10 | 70 | 3,74 | 4,1 | 110 |
| $AB_1^{(3)}, AB_1^{(1-2)}$ | 3 | 100 | 1,67 | 5,3 | 317 |
| $AB_1^{(3)}, AB_{2-3}$ | 3 | 100 | 1,63 | 2,8 | 172 |
| \overline{bB}_8 | 3 | 0 | 4,2 | -1,8 | - 42 |
| \overline{bB}_{10} | 3 | 100 | 1,2 | 3,1 | 258 |
| HOB_1 | 2 | 100 | | _ | Скважины ППД |
| Всего | 68 | 80 | 3,23 | 4,4 | 136 |

Таблица 1–Результаты опытно-промысловых испытаний УЗ-технологии

Анализ геолого-физических характеристик пластов и эффективности УЗ-обработки скважин

Пласт AB_1^{1-2} . Эффективные толщины данного пласта по площади Самотлорского месторождения довольно устойчивы, хотя и изменяются в целом от 0 до 30,4 м. В разрезе горизонта AB_1^{1-2} выделены два существенно различных типа строения, обладающих разными геолого-промысловыми характеристиками (ГПХ): глинистые коллекторы типа "рябчик", которые занимают большую часть площади пласта AB_1^{1-2} (около 80–85 %), процессы фильтрации в которых имеют очень сложный и до конца не изученный характер.

Проведённые на этом пласте УЗО являются наиболее успешными, где средний прирост по дебиту составил 6,7 т/сут. Из 12 опрераций по УЗО скважин лишь одна была с сомнительной успешностью где прирост по дебиту составил 0,4 т/сут. Успешность УЗО объясняется в первую очередь тем, что пласты "рябчик" характеризуется перемежением нефтеносных пропластков с непроницаемыми глинистыми слоями, а при использовании УЗ-технологии, в силу ее высокой избирательности, подвергаются обработке только нефтенасыщенные пропластки.

Пласты AB_1^3 и AB_{2-3} . Данные пласты принадлежат к мощной толще палеодельтовых отложений и во многом имеют схожий характер строения. Пласт характеризуется самым низким среди пластов AB_{1-5} средним коэффициентом песчанистости, равным 0,45, при довольно высокой расчленённости 7,23. Для обоих пластов характерна общая тенденция уменьшения эффективных толщин с юго-востока на северо-запад. В разрезе пласта AB_1^3 преобладают слабоглинистые коллекторы, составляющие 79 % его нефтенасыщенного объёма, при средней нефтенасыщенной толщине 4,4 м. Доля сильно глинистых коллекторов – 21 % при средней нефтенасыщенной толщине 1,3 м. Зоны повышенных эффективных толщин приурочены к отдельным каналам северозападного простирания, в которых залегают слабоглинистые коллекторы. Протяжённость каналов до 10 км при ширине от 1 до 2 км. Максимальные толщины таких каналов фиксируются на северозападе Приобского участка. Области между отдельными каналами представлены разрезом с тонким чередованием коллекторов.

Наибольшее число операций проведено на пласте AB_{2-3} . Было обработано 23 скважины. Успешность 74 %, средний прирост составил 2,54 т/сут. В 6 скважинах получен отрицательный результат. На трех скважинах были вскрыты перфорацией два пласта: AB_1^3 и AB_1^{1-2} и еще на трёх скважинах $-AB_1^3$ и AB_{2-3} . На всех шести скважинах обработка была успешной и эффект составил в среднем 4 т/сут.

Пласт AB₄₋₅. Этот пласт характеризуется практически монолитным строением, непроницаемые прослои в его разрезе представлены исключительно уплотненными карбонатизированными песчаниками. В северном и северо-западном направлениях происходит

постепенная глинизация разреза, начинающаяся с кровли и подошвы пласта. В результате слаборасчленённой остается преимущественно средняя часть пласта, выше которой разрез представлен частым переслаиванием прослоев коллекторов и непроницаемых разностей. Эффективные толщины пласта в его южной части достигают 68 м. Пласт AB₄₋₅ характеризуется весьма высокой степенью латеральной связанности коллекторов, литологические экраны фильтрации практически отсутствуют. В то же время наличие нередко встречаемых прослоев уплотнённых карбонизированных песчаников в определённой степени затрудняет вертикальную миграцию флюидов, вследствие чего в общирной водонефтяной зоне пласта выработка запасов довольно продолжительное время происходила без заметного конусообразования.

Здесь получены довольно хорошие результаты УЗО. Из 10 обработанных скважин при успешности 70 % получен средний прирост 4,1 т/сут. При этом на трех скважинах опять была проведена деоптимизация по причине отсутствия требуемого оборудования. На скв. 3788 спущен ЭЦН-25 вместо ЭЦН-50, на скв. 13549 – ЭЦН-15 вместо ЭЦН-25 и на скв. 353999 – ЭЦН-35 вместо ЭЦН-50. На всех трёх скважинах динамический уровень повысился по сравнению с уровнем до обработки на 100 м и более. За вычетом этих скважин эффективность составляет 6 т/сут.

Пласт Б**B**₈. В целом для пласта характерны эффективные толщины около 2...8 м (в 2/3 случаев), нефтенасыщенные – 2...4 м (60 % случаев). В пределах лицензионного участка эффективные толщины песчаников довольно закономерно убывают с востока на запад вплоть до полной глинизации на западной границе площади. На востоке месторождения песчаное геологическое тело можно назвать массивным, на западе песчаные тела залегают в виде отдельных линз с незначительной эффективной толщиной, общая толщина пласта к западу также уменьшается. Отдельные литологические залежи сложной конфигурации расположены на Мыхпайском участке, где эффективные нефтенасыщенные толщины не более 3 м при средней толщине 1,8 м.

Проведённые на данном пласте три операции по УЗО скважин дали отрицательный результат. Основной причиной является увеличение процента воды в добываемом флюиде: по скв. № 6155 содержание воды увеличилась с 33 до 97 %, хотя дебит жидкости вырос с 6 до 44 м³; по скв. № 10896 обводнённость выросла с 52 до 61 %, при этом коэффициент продуктивности вырос с 0,117 до 0,141; по скв. №3804 обводнённость выросла с 46 до 96 %. Анализ результатов показал, что к скважинам была подтянута "воронка" воды и увеличение дебита привело к их прорыву, что гворит о том, что был проведен неправильный подбор скважин для УЗО.

Пласт Б B_{10} в песчаных фациях залегает в виде обширной полулинзы, ограниченной непроницаемыми породами с юго-востока, юга и запада. Эффективные толщины в пределах этого песчаного тела достигают 13,8 м, но преобладающими являются значения 2...4 м (34 % случаев) и 4...8 м (31 % случаев). Толщины менее 2 м составляют 23,5 %. Практически такое же распределение характерно и для нефтенасыщенных толщин. По строению примерно на 95 % площади пласт представляет собой переслаивание песчаников с непроницаемыми породами, при этом чаще всего коллекторы тяготеют к верхней части разреза пласта. На локальных участках отдельные прослои сливаются между собой, создавая разрезы с высокой степенью песчанистости. Проницаемые прослои в верхней части пласта являются сравнительно выдержанными, ниже они приобретают отчётливую линзовидную форму залегания.

По пласту BB_{10} проведены 2 операции с успешностью 100 % и получен средний прирост 3,1 т/сут. На пластах BB_{10} и IOB_1 проведены 3 операции по УЗО нагнетательных скважин с успешностью 100 % и увеличение приёмистости составило от 300 до 500 %.

Результаты ОПИ позволили уточнить критерии предъявляемые к скважинам-кандидатам для УЗО

Критерии выбора скважин для ультразвуковой обработки. В работе [50] на основе данных полученных в результате ОПИ с использованием УЗ-технологии, проведён анализ с целью установления корреляционной связи между удельным суточным приростом и геологотехнологическими параметрами, а также оценка тесноты этой связи за период текущей эксплуатации после УЗО. В качестве показателей эффективности УЗО был использован средний суточный прирост нефти на скважину, полученный через 6 мес. работы скважины после УЗвоздействия. Факторами, влияющими на эффективность, были выбраны геолого-технологические параметры скважин: пластовое давление, эффективная и общая толщины пласта, проницаемость, пористость, расчленённость, число пропластков по интервалу перфорации, накопленная добыча нефти, накопленная добыча жидкости, коэффициент песчанности, коэффициент продуктивности до обработки, обводненность до УЗО и т.д.

Результаты факторного анализа свидетельствуют о том, что суточный прирост нефти после УЗО в первую очередь зависит от поддержания пластового давления. Обработки были наиболее эффективными, если отношение текущего пластового давления к первоначальному было в пределах 0,75...0,9. Максимальный прирост дебитов нефти достигается при снижении текущего пластового давления не более чем 15 % от первоначального, а предельное – не более 25 %.

Вторая по значимости корреляционная связь получена между среднесуточным приростом нефти и показателями обводненности скважин. Эффективность обработок снижалась, если обводненность скважин-кандидатов превышала 80 %. Как правило, чем меньше пропластков и однороднее по строению пласт, тем выше эффективность обработки. В том случае, когда толщина пласта не превышает 3...4 м, вероятность выполнения успешной обработки резко снижается.

На основе анализа литературных данных [6] и результатов ОПИ с использованием УЗтехнологии определены критерии, которым должны удовлетворять характеристики пластовой нефти и геофизические характеристики скважины-кандидата для проведения УЗО. Таким образом, ОПИ позволили сформулировать алгоритм подбора скважин-кандидатов [7–12]

Выводы

1. Проанализировав опыт УЗО пластов, можно сделать следующие выводы:

- успешность выполненных операций составила 80 %;
- число неуспешных операций 13, из которых по объективным причинам 10;
- средний прирост дебита нефти по скважинам 4,23 т/сут;

- наиболее успешными оказались УЗО пласта AB_1^{1-1} "рябчик", где преимущество УЗтехнологии проявилось в ее избирательности воздействия. До этого применялись в основном химические обработки, где кислота шла по наиболее проницаемым промытым участкам, поэтому часть пропластков не была включена в работу.

 необходимым условием для эффективного проведения УЗО является работа на депрессии, для выноса продуктов реакции (диспергированных продуктов засорения) из пласта в скважину, а еще лучше на поверхность.

3. Среди использованных схем создания депрессии на пласт в сочетание с УЗО:

- свабирование является самым простым и наименее затратным из всех применяемых методов.

 наиболее эффективным методом создания депрессии на пласт является использование струйного насоса в сочетание с УЗО. Хотя данный метод более затратный по времени и стоимости, однако средняя продолжительность эффекта обработки скважин почти в 2 раза и более раза выше по сравнению с остальными методами.

4. ОПИ показали важность правильного подбора скважин для повышения эффективности и успешности УЗО, на основании сформулированных требований к скважинам, алгоритма подбора скважин и наличия опытных специалистов.

Литература/References:

1. Кузнецов О.Л., Ефимова С.Ф. Применение ультразвука в нефтяной промышленности. М.: Недра, 1983. 192 с.

2. Вахитов Г.Г., Симкин Э.М. Использование физических полей для извлечения нефти из пластов. М.: Недра, 1985. 231 с.

3. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация технологических процессов добычи и переработки нефти, очистки нефтезагрязненных вод и грунтов; дис. ... докт. техн. наук. М.: Моск. гос. университет инженерной экологии, 2011. 391 с.

4. Муллакаев М.С. Ультразвуковая интенсификация добычи и переработки нефти. М.: ОАО "ВНИИОЭНГ", 2014. 168 с.

5. Mullakaev M.S. Ultrasonic intensification of the processes of enhanced oil recovery, processing of crude oil and oil sludge, purification of oil-contaminated water. – M.: HELRI, 2018. - 376 p.

6. Апасов, Г.Т., Апасов, Т.К., Салтыков Ю.А., Апасов, Р.Т., Абрамова, А.В., 2012. Факторы, влияющие на эффективность при ультразвуковом воздействии на прискважинную зону пластов Самотлорского месторождения. Наука и ТЭК. 6: 17–20.

7. Abramov, V.O., Mullakaev, M.S, Abramova, A.V., Esipov, I.B., Mason, T.J., 2013. Ultrasonic technology for enhanced oil recovery from failing oil wells and the equipment for its implemention. Ultrason. Sonochem. 20: 1289–1295.

8. Mullakaev, M.S., Abramov, V.O., Abramova, A.V., 2015. Development of ultrasonic equipment and technology for well stimulation and enhanced oil recovery. J. Pet. Sci. Eng. 125: 201–208.

9. Mullakaev, M.S., <u>Abramov, V.O.</u>, <u>Abramova, A.V.</u>, 2017. Ultrasonic automated oil well complex and technology for increasing the productivity of marginal wells. J. Pet. Sci. Eng. 159: 1–7.

10. <u>Mullakaev M.S.</u>, <u>Abramov V.O.</u>, <u>Abramova A.V.</u>, 2017. Ultrasonic piezoceramic module and technology for stimulating low-productivity wells. J. Pet. Sci. Eng. 158: 529–534.

11. Абрамов, В.О., Муллакаев, М.С., Баязитов, В.М., Тимашев, Э.О., Кулешов, С.П., Прокопцев, В.О. 2013. Опыт применения ультразвукового воздействия для восстановления продуктивности нефтяных скважин Западной Сибири и Самарской области. Нефтепромысловое дело. 6: 26–31.

12. Муллакаев, М.С., Салтыков, Ю.А., Салтыков, А.А., Муллакаев, Р.М., 2019. Анализ опытнопромысловых испытаний ультразвуковой технологии на скважинах Самотлорского месторождения. Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. 7: 71–85.

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF EM METHODS ON THE VISCOSITY OF A MIXTURE OF SULFUR AND HIGH-SULFUR PARAFFINIC OILS

L. A. Kovaleva¹, V.N. Kireev², R.R. Zinatullin³, G. I. Mukharyamova⁴

¹Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technology 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, 32; <u>liana-kovaleva@yandex.ru</u> ²Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technology 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, 32; <u>KireevVN@uust.ru</u> ³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technology 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, 32; <u>KireevVN@uust.ru</u> ³Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science and Technology 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, 32; <u>rasulz@yandex.ru</u> ⁴Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Ufa University of Science

and Technology 450076, Republic of Bashkortostan, Ufa, st. Zaki Validi, 32; <u>gulshat-karimova-</u><u>1993@mail.ru</u>

Most of the oil produced in Russia is high-sulfur. So, according to Rosstat, the structure of the Russian oil market in 2020 is such that the share of sulfur oil is 52.2%, high-sulfur oil is 17.5%, and low-sulfur oil is 30.3% [1].

To sell such oil, it is mixed in pipelines with less sulfur grades. Accordingly, the practice of pipeline transport of a mixture of sulfurous oils is quite common in our country, and the tasks of predicting and determining the properties of a mixture of sulfurous oils become relevant. In addition, there is an increase in the share of heavy, highly viscous paraffinic oils in the oil market. This, in turn, makes relevant the problem of introducing and using new technologies for processing such oils for the purpose of their pipeline transport.

In order to solve these problems, the work assessed the adequacy of using the most common dependencies (Kendall-Monroe, Arrhenius, Walter and others [2-4]) for predicting the viscosity of a

mixture of sulfurous oils. Experimental studies were carried out on the influence of radiofrequency electromagnetic (RF EM) influence of a frequency of 13.56 MHz on the rheological properties of a mixture of sulfurous oils. The possibility of using the listed dependencies to predict the viscosity of a mixture of sulfur oils after their EM treatment was experimentally tested too.

Figure 1 shows the results of the experimental determination of the dynamic viscosity coefficients of a mixture of sulfur and high-sulfur oils and calculations using the listed formulas.



Figure 1. Comparison of experimental data with data obtained on the basis of the Kendall-Monroe, Arrhenius, Walther formulas, the generalized formula and the regression equation for a mixture of untreated oils and oils after RF EM treatment

1 - Coefficient of actual dynamic viscosity of the oil mixture; 2 - according to the Arrhenius formula; 3 - according to the Kendall-Monroe formula; 4 - according to Walther's formula; 5 - according to the generalized formula, 6 - according to the regression equation.

As a result of an experimental and analytical study of the possibility of using the existing most well-known formulas for determining the viscosity of a mixture of oils before and after RF EM treatment, it was revealed that the most accurate results for determining the viscosity for mixing high-sulfur and sulfur oils are given by the formulas: Kendall-Monroe, Arrhenius (calculation errors using these formulas for the untreated mixture -7%, the mixture after RF EM treatment -9%) and the regression equation (the error for the untreated and treated mixture was 6%). The Walter equation and the generalized formula for calculating the viscosity of a mixture of petroleum products and oil are not recommended for practical use due to the large error.

It was also revealed that RF EM exposure to a mixture of sulfurous oils leads to an improvement in the rheological characteristics of the resulting mixture: the dynamic viscosity coefficients decrease and the of the thixotropic properties of the mixture, which appear at temperatures below 5°C, disappear (Figure 2).

From Figure 2 it can be seen that immediately after EM treatment in the temperature range 1 to 30 C°, the coefficient of dynamic viscosity of high-sulfur oil decreases almost 1.5 times. Especially, it is visible in the temperature range up to 15 C°, corresponding to the operating temperatures of main oil pipelines, the decrease in oil viscosity is most significant. The maximum of viscosity decreasing is observed at a temperature of 7 C° and amounts to 20 cP. A similar effect is observed for the mixture of studied oils: the relaxation time after RF EM exposure for a mixture of sulfur and high-sulfur oils is 5 days. In general, with an increase in the concentration of high-sulfur oil in the mixture, the effectiveness of RF EM exposure on the mixture also increases, since the high-sulfur oil is affected by the HF EM field to a greater extent than sulfurous oil.



Figure 2. Dependence of the dynamic viscosity coefficient of high-sulfur paraffinic oil on temperature before and after RF EM treatment 1 – before treatment, 2 – after RF EM treatment.

ACKNOWLEDGMENTS

The study was supported by the Russian Science Foundation (project no. 19-11-00298).

Литература/References:

- Oil and gas equipment market. Prospects for the development of the industry [Electronic resource]. URL: https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/681998-rynok-neftegazovogo-oborudovaniyaperspektivy-razvitiya-otrasli/ (date of access: 09/11/21). Business magazine "Neftegaz.RU"
- Reed R.R., Prausnitz J., Sherwood T. // Properties of gases and liquids: A reference guide / Transl. from English edited by B.I. Sokolova. — 3rd ed., revised. and additional - L.: Chemistry, 1982. -592 pp., ill. - New York, 1977.
- Akhatov Sh. N., Rational formula for determining the viscosity of a mixture of oil and petroleum products / Sh. N. Akhatov [et al.] // Transport and storage of oil and petroleum products. - 1972. -No. 4. - P. 4-5.
- 4. Baykova L. R., Garris N. A., Karimova G. I. Multiple regression model for determining and predicting the viscosity of crude oils mixture //IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2019. T. 272. No. 2. S. 022154.