ЭНЕРГЕТИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

DOI: 10.18721/JEST.230301

УДК 502/504

А.С. Большев, Ю.С. Васильев, А.И. Альхименко

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация

ОХРАНА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРИ ОСВОЕНИИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ РЕСУРСОВ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

В статье рассматриваются проблемы разработки мероприятий по предотвращению загрязнения морской среды и ликвидации последствий аварийных разливов нефти на арктическом шельфе при наличии льда на поверхности моря. Обсуждаются проблемы экономической рентабельности добычи углеводородов на шельфе с учетом затрат на оборудование для предотвращения и ликвидации аварийных разливов нефти. Для эффективности предотвращения появления нефтяных пятен подо льдом важно международное сотрудничество в области производства оборудования для этих операций. Ключевыми моментами в борьбе с нефтяными пятнами являются обнаружение и слежение за их движением под действием течений воды и характеристик нижней поверхности льда. Необходима разработка математической модели движения пятен нефти подо льдом, основанная на результатах экспериментальных и теоретических исследований. Есть ряд причин, объясняющих отсутствие таких моделей. Первая: натурные исследования требуют значительных усилий, материальных затрат и т. д., а лабораторные эксперименты не обеспечивают требуемой точности результатов. Вторая: математическое описание движения пятен нефти подо льдом требует информации о параметрах течений воды и шероховатости нижней поверхности льда, которая обычно отсутствует. Серьезной проблемой является разработка оборудования для ликвидации пятен нефти.

АРКТИЧЕСКИЕ ПРОЕКТЫ; КОНТИНЕНТАЛЬНЫЙ ШЕЛЬФ РОССИИ; РАЗЛИВЫ НЕФТИ ПОДОЛЬДОМ; ЛИКВИДАЦИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ РАЗЛИВОВ НЕФТИ ПОДО ЛЬДОМ; КОМПЛЕКСНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ.

Ссылка при цитировании:

А.С. Большев, Ю.С. Васильев, А.И. Альхименко. Охрана окружающей среды при освоении углеводородных ресурсов арктических морей // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2017. Т. 23. № 3. С. 7—15. DOI: 10.18721/JEST.230301

A.S. Bolshev, Yu.S. Vasiliev, A.I. Alhimenko

Peter the Great St. Petersburg polytechnic university, Saint-Peterburg, Russian Federation

ENVIRONMENT PROTECTION IN THE DEVELOPMENT OF CARBON-NITROGEN RESOURCES OF ARCTIC SEAS

The paper considers some problems of developing the measures on prevention of marine pollution and elimination of oil spills under ice cover. We have discussed problems of economic effectiveness taking into account the capital cost of the environment protection. An important factor of effective prevention of oil spills is international collaboration in the field of production of effective equipment for operations

on eliminating oil spills under ice cover. A key factor of combatting oil spills is finding and tracking their motion influenced by water currents and ice bottom surface characteristics. It is necessary to develop a mathematical model based on experimental and theoretical data. There are some reasons explaining such data. First, field experiments take a lot of efforts, time etc., at the same time laboratory experiments do not provide accurate results. Secondly, mathematical description of tracking oil spills under the ice cover requires information about current parameters and roughness of the bottom surface of ice cover which usually not known. A serious problem is developing the equipment for elimination of oil spills.

ARCTIC PROJECTS; CONTINENTAL SHELF; OIL SPILLS UNDER ICE COVER; ELIMINATION OF OIL SPILLS; EQUIPMENT FOR COLLECTING OIL SPILLS; THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCH STUDIES.

Citation:

A.S. Bolshev, Yu.S. Vasiliev, A.I. Alhimenko, Environment protection in the development of carbon-nitrogen resources of arctic seas, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering sciences and technology*, 23 (03) (2017) 7–15, DOI: 10.18721/JEST.230301

Введение

Из перспектив развития современной России вытекает стратегическая важность освоения ресурсов арктических акваторий. Экономическая зона РФ составляет более 14 миллионов квадратных километров, что в два раза больше площади всех вместе взятых стран Западной Европы. Освоение таких громадных пространств, безусловно, будет связано с извлечением минерального сырья, био- и энергетических ресурсов, необходимых для дальнейшего индустриального развития России.

Ресурсы углеводородов на континентальном шельфе России составляют 20—25 % от общемировых запасов нефти и газа. Более 60 % ресурсов находится на глубинах моря менее 100 м, что с точки зрения технической доступности и реальности их освоения весьма важно [1].

Открыты месторождения на шельфе восьми морей России: на шельфе арктических морей (Баренцево и Карское) — 17 месторождений, на шельфе Сахалина и Камчатки (Охотское и Японское моря) — 13, на российском участке шельфа Каспийского моря — 10, на Азовском море — 3, на Балтийском — 2 месторождения.

Наиболее интенсивное строительство морских гидротехнических объектов в течение последних 10—15 лет происходило на шельфе дальневосточных морей. Только на шельфе о. Сахалин открыто девять нефтегазоносных участков с совокупными запасами 1,19 трлн куб. метров газа, 394,4 млн т нефти и 88,5 млн т газового конденсата.

В рамках реализации проектов под общим названием «Сахалин» начиная с 1997 года были

установлены одна за другой следующие ледостойкие платформы [2]: Пильтун-Астохская-А, Пильтун-Астохская-Б, Лунская-А («Сахалин-2»), «Орлан» и опорное основание платформы «Беркут» («Сахалин-1»).

На шельфе Баренцева моря в 60 км от берега находится Приразломное нефтяное месторождение. Глубина моря в районе месторождения составляет 18—20 м. Основной объект обустройства месторождения — морская ледостойкая нефтедобывающая платформа гравитационного типа «Приразломная» [3]. Платформа обеспечивает бурение скважин, добычу нефти, а также ее хранение и отгрузку.

В восточной части Баренцева моря в районе поселка Варандей на расстоянии 21 км от берега установлен самый северный в мировой практике стационарный морской ледостойкий отгрузочный причал «Варандей» [4]. Варандейский терминал успешно эксплуатируется, круглогодично обеспечивая бесконтактную швартовку танкеров дедвейтом до 70000 т и отгрузку нефти на танкер.

Крупнейший проект освоения Штокмановского газоконденсатного месторождения в Баренцевом море [5] около десяти лет находится на концептуальной стадии и, по всей видимости, может быть реализован в ближайшее десятилетие.

Проекты освоения углеводородов на континентальном шельфе требуют чрезвычайно больших капиталовложений и решения сложных инженерных задач. Однако несмотря на ряд проблем, в том числе кризисные явления, указанные проекты интенсивно развиваются, а объем морской добычи неуклонно возрастает.

Проблемы прогнозирования и ликвидации аварийных разливов нефти в условиях арктических морей

Повышенное внимание промышленному освоению шельфовой зоны арктических морей Российской Федерации уделено в выступлении президента РФ В.В. Путина в Салехарде. Он заявил, что право добывать нефть на арктическом шельфе России будет предоставлено только тем компаниям, которые обладают технологиями ликвидации последствий разливов нефти подо льдом.

Б. Обама в бытность свою президентом США в 2016 году запретил продажу лицензий нефтедобывающим компаниям на 5 лет из тех же соображений. Эта отсрочка дает возможность ученым, инженерам предложить новые решения по охране окружающей среды при добыче нефти на северном шельфе.

Стоимость добычи энергоносителей на северном шельфе в настоящее время не включает в себя затраты на предотвращение загрязнения природной среды, поскольку оборудования для ликвидации последствий аварийных разливов нефти нет не только у РФ, но и ни у какой другой страны. Затраты на его создание и производство могут быть весьма значительными и повлиять на стоимость шельфовой нефти в сторону ее повышения. Известно, что экосистемы северных морей весьма чувствительны к загрязнениям, устойчивость их по отношению к внешним воздействиям невелика. Особенно это относится к загрязнению арктических морских вод нефтью и нефтепродуктами. Примеры таких воздействий известны. Один из них — авария танкера «Exxon Waldiz» в водах Аляски. Операции по ликвидации разлива нефти длились около 2 лет и стоили правительству США около 2 млрд \$. Однако последствия этого разлива проявляются до настоящего времени.

Приблизительные расчеты распространения загрязнений нефтью для скважины месторождения «Приразломная» были проведены совместно сотрудниками WWF и Гринпис России. Для расчетов в качестве исходных данных были приняты следующие объемы: 1500 т для скважины и 10 000 т для танкера. В зоне возможного загрязнения оказалась акватория площадью 140000 кв. км и береговая линия длиной 3500 км.

Наиболее вероятными причинами разливов в морской среде являются аварии танкеров, перевозящих сырую нефть. Это объясняется большим объемом перевозимой нефти и большими объемами разливов при подобных авариях. Наиболее рентабельна перевозка нефти в танкерах грузоподъемностью свыше 100 тыс. т. Риск аварии такого танкера при плавании в ледовой обстановке резко возрастает, а влияние на морскую среду может стать катастрофическим.

Добыча углеводородов из подводных скважин и последующая их транспортировка подводными трубопроводами к месту погрузки также создают существенный риск аварийного разлива. Наиболее неблагоприятное действие такие аварии оказывают при наличии льда на поверхности воды и малом расходе через отверстие в трубе, когда пятна нефти не фиксируются ни дистанционными средствами наблюдений, ни визуально, а объем выливающейся нефти увеличивается.

Таким образом, важные требования, предъявляемые к мероприятиям по предотвращению загрязнения морской среды и ликвидации последствий аварийных разливов нефти на арктическом шельфе [6], — это наличие аппаратуры контроля утечек, комплекс устройств для сбора разлитой нефти, невысокая стоимость и возможность применения указанных технических средств в сложных погодных условиях.

Международная общественность проявляет пристальное внимание к работам по изучению возможности ликвидации последствий нефтяных разливов подо льдом. Сказанное выше в отношении загрязнения морской среды относится не только к нефти, но и к природному газу.

Как в РФ, так и за рубежом существует целый класс математических моделей распространения пятен разлитой нефти под действием ветра, волнения и течений по открытой поверхности воды [7]. Эти модели апробированы, обеспечивают достаточную точность в расчетах. Существуют оборудование различных модификаций для сбора нефти с поверхности воды и технологии его использования. В Санкт-Петербурге на акваториях р. Невы и Финского залива регулярно проводятся учения по ликвидации последствий аварийных разливов нефти и нефтепродуктов. Однако целый ряд портовых акваторий на севере

 $P\Phi$ (не только в арктической зоне) функционирует в течение круглого года, включая период ледостава.

Влияние нефти, находящейся в водной среде при наличии льда на ее поверхности, существенно сильнее, чем нефти, находящейся на свободной поверхности [8]. Это связано с рядом факторов:

нефть подо льдом оказывает более губительное воздействие на морские экосистемы, чем аварийные разливы нефти на свободной поверхности воды;

вопрос распространения нефти в водной среде при наличии льда исследован в гораздо меньшей степени, чем разливы на свободной поверхности моря;

возможности ликвидации последствий разливов нефти подо льдом ограничены по сравнению с аналогичными ситуациями на открытой воде.

Следует подчеркнуть, что вопрос ликвидации последствий аварийных разливов нефти в ледовых условиях касается не только работ на арктическом шельфе, но и движения судов в морских портах, таких как Санкт Петербург, Архангельск и др. [9,10]. При интенсивном движении судов на портовых акваториях и на подходах к портам возможны аварии судов в резуль-

тате их столкновений, бункеровки, перегрузки нефтепродуктов наплаву и по другим причинам. Естественно, что такие разливы имеют значительно меньшие масштабы, чем те, которые возможны при авариях на шельфе, однако и акватории, в которых они происходят, меньше по размеру. Учитывая тот факт, что эти разливы происходят поблизости от береговой черты, преуменьшать их воздействие не следует.

Наличие льда на поверхности акватории вносит серьезные коррективы в планы ликвидации аварийных разливов нефти (ЛАРН). Так, например, использование боновых ограждений для локализации разливов становится невозможным или неэффективным, движение нефтяных пятен подо льдом и изменение их характеристик во времени и пространстве существенно отличается от тех, которые наблюдаются на открытой воде. Отдельные исследования и учения по применению оборудования для сбора нефти проводились в скандинавских странах (Финляндия, Норвегия) и в Канаде (рис. 1). Однако результаты этих работ не могут быть признаны удовлетворительными ни по качеству математических моделей, ни по рекомендациям в плане оборудования.

Представители служб береговой охраны восьми стран — Канады, Дании, Финляндии,



Рис. 1. Сбор разлитой нефти в ледовых условиях у берегов Норвегии

Fig. 1. Collection of oil spills in ice conditions of the coasts of Norway

Исландии, Норвегии, Швеции, России и США, имеющих соответствующие интересы в Арктике, стали участниками форума, который прошел 23 марта 2017 г. Задачей форума была разработка стратегии и тактики для общих операций при соблюдении суверенных прав государств-участников на проведение собственной политики. Серьезным препятствием для организации совместных операций стало то, что Россия, не будучи членом НАТО, не может получать информацию об обстановке в арктическом регионе от своих потенциальных партнеров, поскольку это противоречит действующим правилам НАТО. Предстоит совместными усилиями преодолеть это препятствие до конца года. Это важная задача, поскольку для ликвидации последствий разливов необходимы совместные усилия стран**участниц**.

В настоящее время в РФ, как и в других странах, отсутствуют нормативные документы, позволяющие составлять планы ЛАРН при наличии льда на поверхности акватории. По сути дела, это освобождает лиц, ответственных за составление планов, от учета льда. Вместе с тем понятно, что добыча углеводородов на арктическом шельфе не может развиваться без обеспечения экологической безопасности соответствующих работ.

Подходя к выбору способа ликвидации нефти в условиях арктических морей, следует различать два случая:

нефть находится под сплошным льдом и не имеет контакта с атмосферой;

нефть находится в зоне битого льда и имеет контакт с атмосферой.

Разница между ними состоит в том, что в первом случае при отсутствии контакта с атмосферой отсутствует контакт нефти с нижней поверхностью льда. Между линзой нефти и льдом всегда находится тонкий слой воды, в результате чего нефть перемещается, не оставляя следов на нижней поверхности льда.

При отсутствии слоя воды нефть прилипает к поверхности льда (рис. 2), а очистить поверхность льда, вступившую в контакт с нефтью, трудно.

Основными затруднениями при математическом описании распространения нефти подо льдом следует полагать следующие.

1. Сложность описания взаимодействия отдельных линз нефти с нижней поверхностью льда. Как показали лабораторные эксперименты [11], пленка нефти под нижней поверхностью льда распадается на ряд линз нефти, размеры и количество которых зависят от характеристик нефти или нефтепродукта, в частности от плотности



Рис. 2 Нефть, налипшая на поверхность льдин при контакте с атмосферным воздухом

Fig. 2. Oil adhering to the surface of ice floes in contact with atmospheric air

и величины поверхностного натяжения. При этом чем меньше плотность, тем больше линз, меньше их толщина и размеры в плане.

- 2. Линзы нефти не соприкасаются с нижней поверхностью льда. Между поверхностью линзы и поверхностью льда всегда остается тонкий слой воды. Этот слой формирует линзу за счет сил поверхностного натяжения, которые на границах «вода нефть» и «вода воздух» имеют разные значения. Чем меньше плотность, тем ближе форма линзы к шару. Наличием слоя воды между нефтью и нижней поверхностью льда объясняется тот факт, что при прохождении нефтяного пятна подо льдом его нижняя поверхность остается чистой. Однако при соприкосновении с воздухом нефть оставляет следы на поверхности льда.
- 3. Несмотря на отсутствие трения между линзами и нижней поверхностью льда, движение линз под действием течения встречает препятствия, обусловленные различной толщиной льда. Наши исследования, проводившиеся на льду Финского залива [12], показали, что при средней толщине льда 70 см отдельные уменьшения толщины, а также впадины могут превышать 30 см. Следует полагать, что при большей толщине льда в арктической зоне впадины могут быть более глубокими. Природа этих неровностей различна: они могут быть обусловлены локальными течениями, особенностями строения дна и т. п.
- 4. Направление и скорость движения облака линз нефти определяются скоростью действующего течения и шероховатостью нижней поверхности льда. Наличие впадин на нижней поверхности льда в сочетании с малыми скоростями воздействующего течения может обусловить накопление нефти во впадинах. Выйти оттуда нефть сможет только при превышении некоторой критической скорости воздействующего течения.
- 5. Сказанное относится только к прочному льду при минусовых температурах воздуха. В весенний период при положительных температурах воздуха начинается таяние льда. В толще льда появляются «каналы рассола» каналы, по которым нефть начинает подниматься к поверхности льда в результате эффекта поверхностного натяжения. На поверхности льда образуются лужи нефти, от которых трудно избавиться.

Таковы основные трудности на пути математического описания движения нефти подо льдом. Представляется, что некоторых из них можно избежать, приняв ряд допущений, упрощающих решение. Однако для того чтобы оценить влияние этих допущений на результаты расчетов, необходимо калибровать эти модели, то есть провести обширные экспериментальные исследования.

Следует отметить, что моделировать движение нефти подо льдом в лабораторных экспериментах не представляется возможным, поскольку как толщина пленки нефти, так и размер и количество линз изменяются по зависимостям, которые мы в данном случае ищем.

Единственным выходом является проведение натурных исследований. Проведенные нами [13] натурные исследования позволили определить значения скорости движения облака линз для двух значений скорости воздействующего течения и, соответственно, для двух значений коэффициентов дисперсии в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Такие исследования следовало бы продолжить для более широкого диапазона скоростей течений и характеристик различных видов нефти и нефтепродуктов. Кроме того, упомянутые исследования проводились при наличии прочного льда. Представляет интерес проведение исследований в весенний период, когда использование плавсредств еще невозможно, а снегоходов — уже невозможно.

Результаты обширных экспериментальных исследований должны стать основой для уточнения и калибровки теоретических моделей распространения нефти подо льдом. Естественно, что разработка подобных моделей представляет интерес с точки зрения создания устройств и технологий для ликвидации последствий загрязнения. В настоящее время специализированное оборудование такого рода практически отсутствует как в РФ, так и за рубежом.

В качестве примера возможных подходов к ликвидации разливов нефти в арктических условиях можно привести предложенный нами в конце 80-х годов прошлого столетия способ сбора разлитой нефти из-под нижней поверхности льда с использованием движителей судов. Основную идею [11] иллюстрирует рис. 3.

Судно подходит к месту нахождения подо льдом пятна нефти, становится на ледовые якоря

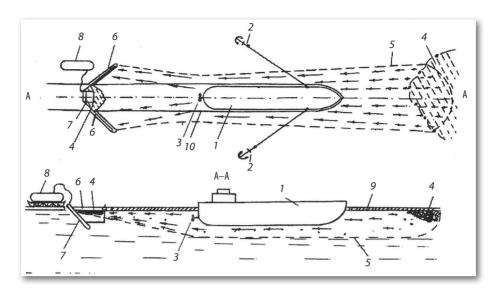


Рис. 3 Схема использования судов для ликвидации пятен нефти подо льдом

Fig. 3. Scheme for using ships to eliminate oil spots under ice

и начинает работать винтами, оставаясь на месте. В результате работы винтов подо льдом создается течение воды, которое увлекает нефть. Далее нефть на чистой воде улавливается бонами и обрабатывается нефтесборщиками. Обозначения на рис. 3 следующие: I — корпус судна; 2 — ледовые якоря; 3 — судовые винты; 4 — нефтяное пятно подо льдом; 5 — область создаваемого течения; 6 — боны; 7 — нефтесборщик; 8 — емкость для сбора нефтеводяной смеси.

Выводы

Освоение ресурсов Арктики требует международной кооперации, включающей в себя разработку технических средств для ликвидации последствий загрязнения морской среды и опе-

ративного обмена информацией об этих загрязнениях.

Требуют развития, причем в условиях дефицита времени, теоретические аспекты распространения нефтяных загрязнений в условиях арктических морей. Технологии ликвидации последствий аварийных разливов нефти в арктических условиях к настоящему времени не обеспечены апробированными и современными техническими средствами.

Названные проблемы можно разрабатывать в рамках федеральных целевых программ научным коллективом, состоящим из сотрудников проектных и научных организаций, путем совместного решения теоретических задач и проведения натурных экспериментальных исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. **Новиков А.И.** Концептуальные подходы к сервисному обслуживанию подводных добычных систем в тяжелых гидрометеорологических условиях // Материалы конференции RAO/CIS Offshore. СПб. 2013. С. 5—9.
- 2. Шхинек К.Н [и др.]. Гидротехнические сооружения на континентальном шельфе России // Гидротехника. XXI век. 2013. № 4 (16). С. 48—56.
- 3. **Торопов Е.Е. [и др.].** Математическое моделирование процесса накатки верхнего строения на опорное основание морской платформы Приразломного нефтяного месторождения // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 70—75.
- 4. **Благовидова И.Л [и др.].** Математическое моделирование и программное исследование работы системы «Морской отгрузочный причал Танкер Буксир» // Труды конференции «Освоение арктического шельфа России». СПб. 2007. № 175.
- 5. Андрюшин А.В., Кутейников М.А. [и др.]. Численное моделирование поведения плавучих шельфовых сооружений под действием ровного льда // Труды III международной научной конференции «Полярная механика». 2016. С. 795—806.
- 6. **Большев А.С., Фролов С.А.** Математическое моделирование поведения объектов обустройства морских нефтегазовых месторождений в ледовых

условиях // Труды Евразийского симпозиума по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2014. С. 56-63.

- 7. **Шхинек К.Н. [и др.].** Результаты моделирования сценариев взаимодействия айсбергов с морскими нефтегазодобывающими комплексами // Навигация и картография. 2015. № 39. С. 25—32. СПб.: Изд-во Гос. научно-исследовательского навигационно-гидрографического института.
- 8. **Поттер С., Трудель Н.** Ликвидация разливов нефти на арктическом шельфе. Environment Research Ltt. 2013, 143 с.
- 9. **Клеванный К.А. [и др.].** Математическое моделирование распространения нефти в воде и ликвидация последствий разливов в ледовых условиях // Тезисы докладов научно-практического симпозиума «Финский залив-96». СПб. 1996. С. 59—60.

- 10. **Ivanov A.Yu. [et al.].** Behavior and monitoring of oil spills in the waters of the Arctic seas // Environment protection in oil and gas complex. 2015. \mathbb{N}_2 5. P. 5–15.
- 11. **Альхименко А.И. [и др.].** Компоненты безопасности линейных газонефтепроводов. СПб.: Изд-во СПбПУ. 2010. 111 с.
- 12. Гидротехнические сооружения морских портов // Под ред. Альхименко А.И. СПб., М., Краснодар, 2014. 423 с.
- 13. Альхименко А.И. Аварийные разливы нефти в море и борьба с ними. ОМ-Пресс. 2004. 232 с.
- 14. **Liukkonen S. [et. al.].** Modelling Oil Pollution under Ice Cover // Proc. of 7-th International Offshore and Polar Engineering Conf. Honolulu, USA, 1997. Vol. II. P. 594–601.
- 15. **Alhimenko A.** Environment pollution of St. Petersburg due to sea and river ports activities // Okologie in Hafenstadten Gemeinschaftsseminar. Hamburg, Germany. 1997. P. 22–31.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

БОЛЬШЕВ Александр Станиславович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: bolshev@cef.spbstu.ru

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук академик РАН научный руководитель Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: president@spbstu.ru

АЛЬХИМЕНКО Александр Иванович — доктор технических наук профессор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. E-mail: a.alhimenko@mail.ru

REFERENCES

- 1. **Novikov A.I.** Kontseptualnyye podkhody k servisnomu obsluzhivaniyu podvodnykh dobychnykh sistem v tyazhelykh gidrometeorologicheskikh usloviyakh. *Materialy konferentsii RAO/CIS Offshore*. SPb. 2013. S. 5–9. (rus.)
- 2. **Shkhinek K.N [i dr.].** Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya na kontinentalnom shelfe Rossii. *Gidrotekhnika. XXI vek.* 2013. № 4 (16). S. 48–56. (rus.)
- 3. **Toropov Ye.Ye. [i dr.].** Matematicheskoye modelirovaniye protsessa nakatki verkhnego stroyeniya na opornoye osnovaniye morskoy platformy Prirazlomnogo neftyanogo mestorozhdeniya. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2007. № 5. S. 70–75. (rus.)
- 4. **Blagovidova I.L [i dr.].** Matematicheskoye modelirovaniye i programmnoye issledovaniye raboty sistemy «Morskoy otgruzochnyy prichal Tanker Buksir». *Trudy konferentsii «Osvoyeniye arkticheskogo shelfa Rossii»*. SPb, 2007. № 175. (rus.)
- 5. Andryushin A.V., Kuteynikov M.A. [i dr.]. Chislennoye modelirovaniye povedeniya plavuchikh shelfovykh sooruzheniy pod deystviyem rovnogo lda. *Trudy III mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Polyarnaya mekhanika»*. 2016. S. 795–806. (rus.)

- 6. **Bolshev A.S., Frolov S.A.** Matematicheskoye modelirovaniye povedeniya obyektov obustroystva morskikh neftegazovykh mestorozhdeniy v ledovykh usloviyakh. *Trudy Yevraziyskogo simpoziuma po problemam nadezhnosti materialov i mashin dlya regionov kholodnogo klimata*. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2014. S. 56–63. (rus.)
- 7. Shkhinek K.N. [i dr.]. Rezultaty modelirovaniya stsenariyev vzaimodeystviya aysbergov s morskimi neft-egazodobyvayushchimi kompleksami. *Zhurnal Navigatsiya i kartografiya*. 2015. № 39. S. 25–32. SPb.: Izd-vo. Gos. nauchno-issledovatelskogo navigatsionno-gidrograficheskogo instituta. (rus.)
- 8. **Potter S., Trudel N.** Likvidatsiya razlivov nefti na arkticheskom shelfe. Environment Research Ltt. 2013, 143 s.
- 9. **Klevannyy K.A. [i dr.].** Matematicheskoye modelirovaniye rasprostraneniya nefti v vode i likvidatsiya posledstviy razlivov v ledovykh usloviyakh. *Tezisy dokladov nauchno-prakticheskogo simpoziuma «Finskiy zaliv-96»*. SPb, 1996. S. 59–60. (rus.)
- 10. **Ivanov A.Yu. [et al.].** Behavior and monitoring of oil spills in the waters of the Arctic seas. *Environment protection in oil and gas complex.* 2015. \mathbb{N}_2 5. P. 5–15.

- 11. **Alkhimenko A.I. [i dr.].** Komponenty bezopasnosti lineynykh gazonefteprovodov. SPb.: Izd-vo SPbPU, 2010. 111 s. (rus.)
- 12. Gidrotekhnicheskiye sooruzheniya morskikh portov / Pod red. Alkhimenko A.I. SPb., M., Krasnodar. 2014. 423 s. (rus.)
- 13. **Alkhimenko A.I.** Avariynyye razlivy nefti v more i borba s nimi. OM-Press. 2004. 232 s. (rus.)
- 14. **Liukkonen S. [et. al.].** Modelling Oil Pollution under Ice Cover. *Proc. of 7-th International Offshore and Polar Engineering Conf. Honolulu, USA.* 1997. Vol. II. P. 594–601.
- 15. **Alhimenko A.** Environment pollution of St. Petersburg due to sea and river ports activities. *Okologie in Hafenstadten Gemeinschaftsseminar*. Hamburg. Germany. 1997. P. 22–31.

AUTHORS

BOLSHEV Aleksandr S.— Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: bolshev@cef.spbstu.ru **VASILIEV Yurii S.**— Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: president@spbstu.ru **ALHIMENKO Aleksandr I.**— Peter the Great St. Petersburg polytechnic university. E-mail: a.alhimenko@mail.ru

Дата поступления статьи в редакцию: 26 мая 2017 г.