

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

ПРОБЛЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕФТИ И ЛЬДА ПРИ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ НА НЕФТЕДОБЫВАЮЩИХ ПЛАТФОРМАХ И НЕФТЕОТГРУЗОЧНЫХ ТЕРМИНАЛОВ, СОПРОВОЖДАЕМЫХ РАЗЛИВАМИ НЕФТИ ПОД ЛЕДЯНОЙ ПОКРОВ

DOI: [10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.62.95](https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.2.62.95)*Сарнавский Денис Валерьевич**ДВФУ, магистрант, г. Владивосток**Сабодаш Ольга Алексеевна**к.т.н. доцент кафедры ГТЗиС ДВФУ, г. Владивосток*

АННОТАЦИЯ.

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование процесса проникновения (диффузии) нефти в лед. При выполнении данной работы применялись следующие методы: экспериментальный метод, метод наблюдения, метод моделирования, метод индукции, метод дедукции. Результаты исследования могут быть использованы в дальнейшем для прогнозирования процесса проникновения нефти в лед при аварийных ситуациях в районах замерзающих морей. Теоретическая значимость заключается в возможности продолжения данной работы и проведение сравнительного анализа с полученными в данном исследовании результатами.

ABSTRACT

The purpose of this work was an experimental study of the process of penetration (diffusion) of oil into ice. When performing this work, the following methods were used: experimental method, observation method, simulation method, induction method, deduction method. The results of the study can be used in the future to predict the process of oil penetration into ice during emergency situations in the areas of freezing seas. The theoretical significance lies in the possibility of continuing this work and conducting a comparative analysis with the results obtained in this study.

Ключевые слова: лед, нефть, диффузия, взаимодействие нефти со льдом, Арктика, разливы нефти.

Key words: ice, oil, diffusion, oil-ice interaction, Arctic, oil spills.

Введение

Потребности мировой экономики на долгую перспективу будут связаны с потреблением первичных энергоресурсов, таких как нефть, газ и уголь. Потребление нефти в 2015 году в мире составило 92,32 млн. тонн в сутки (Жариков Е.П., 2016). В современных условиях, Арктика является важнейшим регионом мира, от которого во многом зависит дальнейшее развитие энергетики и экономики всего мира. Наш век называют «Веком Арктики». Огромные природные богатства (в том числе запасы нефти и газа) заставляют сегодня смотреть на Арктику, как на территорию глубокого освоения в будущем (Мазур И.И., 2004).

По данным геологической службы США (USGS) в Арктике находится пятая часть неразведанных запасов углеводородных ресурсов всего мира, что составляет в цифровом эквиваленте 90 млрд. бар. нефти и 47,3 трл.м³ природного газа (Богоявленский В.И., 2013). Если говорить о перспективности разрабатываемого проекта Сахалин (Сахалин-1,2,3,4,5), то необходимо отметить, что в данном регионе фаза активной добычи нефти рассчитана на долгую работу нефтедобывающих компаний в регионе. Это лишь немногие факты, отражающие факт повышения активности нефтедобывающих компаний в регионе, связанных не только с добычей, но и транспортировкой нефти.

Важно понимать, что быстрые темпы роста разведки и освоения углеводородных ресурсов шельфа повлекут за собой усиление негативного антропогенного воздействия на экосистемы морей северных регионов. К сожалению, сегодня ни одна

из добывающих нефтяных компаний не может со 100-й вероятностью гарантировать полную безопасность от чрезвычайных ситуаций, которые повлекут выброс нефти.

По данным статистики причин аварий, приведших к разливам нефти в акваторию моря, наиболее опасными являются:

1. Отгрузка нефти на челночные танкеры через подводный трубопровод, одноточечный терминал,
2. Морская транспортировка нефти на танкерах,
3. Подводное разведочное (залповые выбросы на нефте- и газопроявлениях) или эксплуатационное бурение нефтяных скважин,
4. Временное хранение нефти в хранилище,
5. Добыча, обработка или подготовка нефти на морской платформе.

Морской лед является одним из основных ограничивающих факторов развития нефтегазовой отрасли. Он оказывает влияние, как на работу самой платформы, так и при разливах нефти. Морской лед отличается по своим физическим свойствам от пресного льда. Ледяной покров начинает образовываться в условиях моря при температуре ниже -1,6⁰C. В силу различных факторов (морские течения, температура) лед подвергается механическим изменениям, в результате чего появляются торосы, айсберги, отдельные ледовые поля (Dana J. 2017).

Нефть, попавшая на поверхность льда или под лед, как правило не распространяется на большие расстояния и локализуется в месте аварийного раз-

лива. Многие исследователи проводили эксперименты по изучению распространения нефти в холодной воде и среди пакового льда (Yara and Venkatesh, 1997; Yara and Belaskas, 1993;). В основном эти работы были посвящены изучению проникновения нефти в лед во времени. Но временные рамки экспериментов в естественных условиях были или слишком большие (месяцы), или слишком малыми (час). Одним из самых важных вопросов в области исследования является учет параметров, влияющих на нарушение контакта нефти со льдом и перемещение пятна под ледяным покровом. Исследования, проводимые Buist et al. в 2008 году показали, что при скорости подводных течений выше 5 м/сек, возможно перемещение нефти подо льдом (Buist T. et al. 2009).

В период с 1975 по начало 2000-х были проведены аналитические исследования распространения нефти под льдом. Лабораторные испытания привели к пониманию происходящих подо льдом процессов, а также предоставили данные, позволяющие определить ключевые параметры распространения. Благодаря полевым испытаниям была получена детальная информация, по которой удалось составить более ясное представление о вероятной динамике распространения. Даже большие разливы сырой нефти под сплошным или непрерывным ледовым покрытием обычно локализуются на относительно небольшом расстоянии от источника разлива (по сравнению с разливом эквивалентного объема нефти на открытой воде), в зависимости от подледных течений и характеристик неровности самого льда (Karlson J., 2009).

В паковых льдах отмечается тенденция к меньшему распространению нефтяного пятна при более высокой его толщине по сравнению с открытой водой. Если сплоченность льда превышает 60–70%, то льдины касаются друг друга, повышая степень естественной локализации разлива. Исследования по распространению нефтяного пятна под паковым льдом проводились в 1986 году на побережье о. Кейп-Бретон в 1986 г. (работы осуществлялись Dickins D. F., 1987). По результатам этих испытаний был сделан вывод, что при высокой сплоченности пакового льда (изначально она достигала 90%, но к концу эксперимента снизилась до 70%), которая отмечалась при проведении эксперимента 1993 г., значительно снизилось распространение пятна (Buist T. et al., 2009).

Нефть является сложным химическим веществом, физико-химические свойства которой меняются в широких пределах: плотность, вязкость. В состав нефти входят смеси многих индивидуальных соединений, массовое содержание которых может различаться. Поэтому следует помнить, что физические свойства нефти являются специфическими параметрами, характерными для каждой данной нефти. Нефть, как и все горючие вещества состоит из 5 элементов, главными среди которых являются углерод и водород. Нефть в своем составе в небольших количествах содержит кислород, серу, азотистые соединения (Калинина Т.А. 2008). Физические свойства нефтей (вязкость, плотность) зависят

главным образом от содержания в них различных групп углеводородов, гетероатомных соединений, смол и асфальтенов. Физические свойства нефти во многом зависят от фракционного состава, отражающего зависимость выкипающего продукта от повышения температуры кипения (Тетельмин Т.Т., Азев В.А. 2014).

В данной работе мы рассматриваем те свойства нефти (вязкость, парафинистость и др.) которые могут повлиять на результаты исследования. Нефть, попавшая в результате разливов в окружающую среду подвергается сложным физико-химическим превращениям, таким как испарение, эмульгирование в воде, окисление, конденсация под действием солнечной радиации, биodeградация (Рябов. В.Д. 2009).

Работы в области детального изучения процесса диффузии нефти в лед на данный момент проводятся за рубежом (конкретно для морского льда). Результаты полученные в исследовании согласуются с общезначимым пониманием проникновения жидкости в пористую структуру. Работы по распространению нефти в ледовых условиях проводились и проводятся в странах, занимающихся добычей нефти на шельфе (Buist T. et al. 2009).

Изучение природы чрезвычайных ситуаций, сопровождаемых разливами нефти по существу делится на несколько направлений:

- Работы, направленные на совершенствование логистической системы доставки аппаратуры к месту ликвидации разливов нефти. В последних диссертационных работах по данной тематике (Garrett R.A. 2016) были проанализированы ранее полученные результаты и предложена математическая модель алгоритмов действий, которые необходимо выполнять при ликвидации разливов нефти, включая возведение современной инфраструктуры;

- Совершенствование методики удаления аварийных разливов нефти. В силу действующего запрета на использование токсичных диспергентов в Арктической зоне, проводятся исследования по разработке диспергентов на основе органических веществ. В докторской работе Kelly Marie McFarlin рассмотрен широкий круг проблем жизненного цикла попавшей в море нефти: биodeградация остаточных нефтепродуктов, создание диспергатора Corexit 9500, сравнение эффективности использования нового диспергатора с аналогичными;

- Изучение процесса проникновения нефти в лед. Результаты экспериментальных работ, проведенных Glover et al. (1999) показали, что лед способен накапливать нефтепродукты в своей структуре до ¼ своей изначальной массы (Glover N.W. et al. 1999). В работе Немировской (2004) было установлено, что главную роль в трансформации пятна нефти под ледяным покровом играют не фетровые процессы, а фильтрация по каналам и капиллярам. В 2009 году проводилась исследовательская работа по изучению диффузии нефти в лед. Эта работа, пожалуй наиболее достоверная из всех, проводимых в данной узкой области исследований. Методика проведения эксперимента предусматривала намораживание льда в условиях холодильной камеры и

постепенном введении под лед масляной линзы. Как вывод в данной работе были учтены особенности проникновения нефти в лед через соляные каналы диаметром 1-9 мм и сделан вывод о том, что основным параметром перемещения нефти в лед является пористость ледяной структуры (рис.1). Нефть

эффективно проникала в морской лед при показателе пористости выше 15%, а при показателе пористости ниже 5% диффузия была минимальна (рис.1) (Karlson J. 2009).

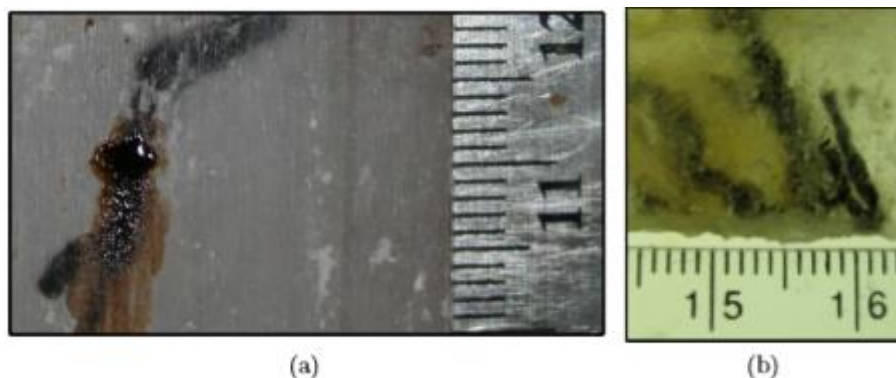


Рис. 1. Иллюстрация исследований проникновения нефти в солевые каналы.

• Исследование дисперсии нефти в водной толще при вертикальном переносе вещества в следствие глубоководного разлива нефти. В диссертационной работе Chen B. представлены результаты исследования распространения нефти в водной толще в процессе подъема вещества вверх под действием выталкивающей силы. Исследование было основано на использовании модели Ленгмюровской циркуляции и турбулентности (Chen B. 2017).

В рамках выполнения работы по изучению влияния ледового покрова при разливах сырой нефти, проводилось модельное исследование процесса диффузии нефти в лед в лабораторных условиях. Данный эксперимент по своему типу является пассивным, т.к. многие факторы, влияющие на процесс диффузии являются объективно неконтролируемыми, т.е. мы сталкиваемся с определенной данностью.

Целью проведения эксперимента является: Изучение процесса взаимодействия (диффузии) сырой нефти и природного льда. Для достижения исследовательской цели, необходимо выполнить следующие задачи:

1. Проведение опыта по исследованию диффузии нефти в лед, с учетом плана ликвидации разливов нефти, утвержденным МЧС,

2. Анализ результатов эксперимента, построение графиков зависимости объема диффузии от основных параметров.

Выполнение моделирования нефти и льда, описывается циклом внедрения нефти в лед, в котором рассчитывается пошаговое внедрения нефти в структуру льда. Используемую аппаратуру в эксперименте разделил на три основные части: измерительные приборы, испытательная аппаратура и образец для эксперимента. Переменные (факторы), влияющие на эксперимент учитывались приборами, но не все были варьируемыми (контролируемыми) (поэтому некоторые были приняты const),

т.к. план эксперимента предусматривал рассмотрение зависимости процесса диффузии от двух генеральных функций: времени и температуры. В данном эксперименте не было внешних переменных, которые могли бы повлиять на результат случайным образом и были бы неконтролируемыми. Условия были приближены к контролируемому эксперименту, если говорить о тех факторах, которые учитывались.

Описание экспериментальной установки

В данном разделе описывается экспериментальная установка и подходы, использованные в ходе проведения эксперимента. Как показано на рисунке 4 а,б, эксперименты по диффузии изучению диффузии нефти в лед проводились в одной установке. На начальном этапе планировалось смонтировать большую установку для проведения эксперимента, но это было невозможно в данной ситуации (отсутствие необходимого времени и финансов). Все эксперименты проводились в холодильной камере при температуре -18°C . В качестве заменителя морской воды, применялась пресная водопроводная вода, в которую добавлялась пищевая соль (NaCl), удельная доля которой среди всех солей морской воды составляет 0,77, в соответствующей пропорции (3,42%) для имитации соленой воды в бухте Новик. После образования раствора соли и пресной воды, емкость с жидкостью помещалась в морозильную камеру для учета точки замерзания, значение которой было $-1,69^{\circ}\text{C}$. Данный результат позволяет предположить, что такой раствор пригоден для проведения эксперимента.

Для проведения эксперимента были смонтированы экспериментальные установки в форме куба, внутри которых выделялось пространство для помещения исследуемого образца льда, а сверху и снизу был полный контакт поверхности с водой и воздухом (рис. 2-3).

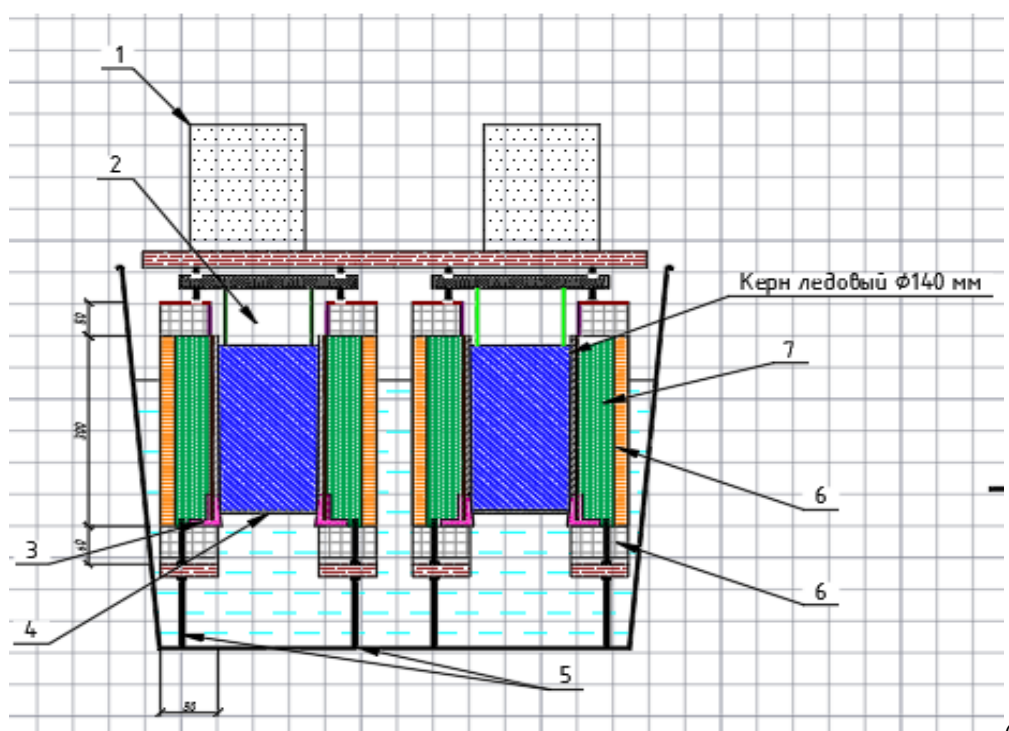


Рис. 2-3. Пример расположения образца в экспериментальной установке,
а – нижняя кромка, б – верхняя кромка.

В лабораторных исследованиях также было важным обеспечение необходимого давления в месте контакта воды и нижней кромки льда. Основываясь на данных методических пособий Назинцева Ю.Л. (2000) и Степанюк И.А. (2001), а также в соответствии с исследованиями, проводимыми за рубежом Richard A. (2016), было принято решение погружать установку так, чтобы 90% высоты керна находилось под уровнем воды. Падение гидростатического давления могло привести к изменению в

текстуре льда, содержанию жидкости в рассольных каналах. Также одной из проблем, которая была всем понятна, но так и не решена в процессе подготовки к эксперименту – нарастание льда снизу. Это вносило свои погрешности в эксперименте, о которых будет указано ниже. Для минимизации, после снятия установок, при извлечении керна применяли сверло, которым размягчали весь наращенный слой льда до той отметки, которая была в начале проведения эксперимента (рис. 4).

Разрез 1 М 1:5



Экспликация экспериментальной установки				
Номер на плане	Наименование			Классификация
1	Пригруз из бетонных цилиндров			B30
2	Труба прижимная $\Phi 120$ мм			ПЭ80
3	Уплотнитель силиконовый технический			A20
4	Нефтяное пятно			Lite
5	Шпилька стальная			СТЗ
6	Технолекс			Г4
7	Монтажная пена			F30

Рис. 4 (а, б). Схема устройства экспериментальной установки для изучения диффузии нефти в лед.

Технология проведения эксперимента

В данном разделе сначала опишем процесс исследования морского льда. В нашем исследовании предварительно проводились исследования по изучению структуры, текстуры льда. В качестве образцов использовались керны диаметром 140 (для проведения эксперимента) и 90 (для исследования структуры) мм, которые выбуривались во второй половине февраля, в бухте Новик в рамках зимней школы (рис.13). После выбуривания, керны помещались на хранения в морозильную камеру при температуре – 17,9°C.

При исследовании морского льда применяют несколько видов классификации льдов:

- Структурно-генетическая классификация (предложенная Н.В. Черепановым),
- Классификация по возрастным категориям (предложенная Росгидрометом в соответствии с международной номенклатурой морских льдов в 1972 г.),
- Классификация по возрастным категориям (предложенная В.В. Лавровым, где за основу берется толщина льда в момент исследования и его возраст).

Процесс воздействия льда на разливы нефти не ограничивается только локализацией в определенном месте пятна, он может быть описан как адсорбция вязкой низкоплотной жидкости в пористую структуру твердого тела, различного по своим теплофизическим параметрам по слоям. Процесс диффузии нефти в лед описывается законом Фика, когда происходит процесс диффузии жидкости в твердую пористую структуру:

1. Первый закон описывает квазистационарный процесс, когда проницаемая для частиц мембрана разделяет две среды (которые могут быть жидкими или газообразными (вода и нефть) с существенно постоянными условиями на границах раздела (температура при опытном исследовании будет поддерживаться на одном уровне):

$$dm = -D \frac{d\rho}{dx} dS dt,$$

где dm – количество диффундирующего вещества за отрезок dt ,

dS – элементарная площадь объекта диффузии (m^2),

$d\rho/dx$ – градиент плотности,

D – коэффициент диффузии (m^2/c).

1. Второй закон описывает нестационарные процессы, заключающиеся в массопереносе между твердыми телами во времени, с постоянной концентрацией на разделе двух фаз. Его, как правило используют при решении задач о взаимодействии двух твердых обоюдно-активных веществ (в металлургии).

$$\frac{(C(x, t) - C_0)}{(C_s - C_0)} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 \sqrt{D * t}}\right),$$

На данный момент имеется необходимое количество компьютерных математических расчетных программ, с помощью которых можно решить стационарную задачу диффузии нефти в лед (Mathlab, Statistic, MS Excell). Несмотря на кажущуюся простоту поставленной задачи, функция диффузии зависит от множества факторов, которые мы будем рассматривать ниже, часть из них мы примем за константу, т.к. их влияние будет различным во времени, усложнит последующие расчеты и возможен недостоверный результат.

Так как данный процесс является сложным и зависит от многих факторов, необходимо использование П-теоремы для перебора и обезразмеривания всех возможных переменных, влияющих на процесс диффузии (табл.1). Исходя из цели и задач исследования, необходимо определить наиболее важные факторы, которые будут влиять на процесс диффузии. Выразим размерность переменных, описывающих процесс диффузии, по отношению к трем основным единицам: масса (M), время (T), длина (L). По результатам проведения литературного обзора по данной тематике стало ясно, что на процесс диффузии будут влиять следующие переменные:

Таблица 1

Исследуемые в эксперименте параметры

Название переменной	Обозначение	Формула размерности
Диффузия	ΔD	$L^3 \cdot T^{-1}$
Кинематическая вязкость жидкости	η	$L^2 \cdot T^{-1}$
Площадь смачивания нефтью	A	L^2
Плотность льда	ρ	$M \cdot L^{-3}$
Скорость проникновения нефти	V	$M \cdot T^{-1}$
Диаметр рассольных каналов	d	L
Высота керна льда	h	L
Время	T	T
Содержание жидкой фазы	ξ_i	$M \cdot L^{-3}$
Ускорение свободного падения	g	$L \cdot T^{-2}$

Допустим, что между этими величинами существует соотношение:

$$\Delta D = f(\eta^a, \rho^b, d^c, V^d, g^e, h^f, A^g, T^h, \xi_i^i),$$

Подставим в эту функцию размерности, выведенные ранее:

$$\Delta D = f[(L^2 T^{-1})^a, (M \cdot L^{-3})^b, (L)^c, (M T^{-1})^d, (L T^{-2})^e, (L)^f, (L^2)^g, (T)^h, (M L^{-3})^i],$$

Для однородности данного уравнения относительно размерностей, должны выполняться следующие соотношения между показателями степени:

$$\text{для } M: 0 = b + d + i,$$

$$\text{для } L: 2 = 2a - 3b + c + e + f + 2g + 3i,$$

$$\text{для } T: -1 = -a - d - 2e + h,$$

Имеем 3 уравнения с 5 неизвестными. Упростим их, исключив b , d и c :

$$b = -i,$$

$$e = 2 - 2a - c - f - 2g - 3i,$$

$$d = 1 - a + h,$$

Подставляем эти соотношения для показателей степени в формулу, получаем:

$$D = f(\eta^a, \rho^{-i}, d^{1-a+h}, g^{2-2a-c-f-2g-3i}, h^f, A^g, T^h, \xi_i^i),$$

Задача о диффузии нефти в лед иллюстрирует вторую часть теоремы Букингема, используемой для проверки результатов анализа размерностей. Согласно П-теореме зависимость переменных в данном эксперименте можно представить в безразмерном виде, объединяя члены с одинаковыми показателями степени:

$$\frac{D}{\eta \cdot A^{1/2}} = f\left[\left(\frac{V \cdot d}{\eta}\right)^e, \left(\frac{V^2}{g \cdot A}\right)^d, \left(\frac{h^2 \cdot \rho}{p \cdot \eta^3}\right)^a, \left(\frac{V \cdot T}{p \cdot A \cdot d}\right)^g, \left(\frac{V}{d \cdot \eta}\right)^c\right],$$

Из приведенных выше безразмерных комплексов видно, что лишь первые два имеют прямое отношение к режиму движения жидкости и описывают физический смысл данного явления, остальные три не имеют физического смысла и их применение в исследовании сомнительно. Обозначим безразмерные комплексы, применяемые в дальнейшем исследовании:

$$Y = \frac{D}{\eta \cdot A^{1/2}}; X_1 = \frac{V \cdot T}{p \cdot A \cdot d}; X_2 = \frac{\xi_i \cdot h}{p \cdot d};$$

Таблица 2

Экспериментальные данные

Время	η (м/сек)	A (м)	V (кг/сек)	T (сек)	d (м)	ρ (кг/м ³)	h (м)	ξ_i (кг/м ³)	t	D (кг)
1	4,32075E-06	0,015	3,9287E-08	3600	0,0029	909,0012	0,265	89,0312	-5,5	3,598E-09
2	4,62425E-06	0,015	3,9287E-08	7200	0,0029	909,0012	0,265	119,08	-3,375	7,221E-09
3	4,60575E-06	0,015	3,9287E-08	10800	0,0029	909,0012	0,265	101,7	-4,075	1,3876E-08
6	0,00000454	0,015	3,9287E-08	21600	0,0029	909,0012	0,265	118,01	-3,45	2,3271E-08
9	4,56375E-06	0,015	3,9287E-08	32400	0,0029	909,0012	0,265	87,43	-4,775	3,1009E-08
12	4,57675E-06	0,015	3,9287E-08	43200	0,0029	909,0012	0,265	98,88	-4,2	3,7809E-08
24	4,40475E-06	0,015	3,9287E-08	86400	0,0029	909,0012	0,265	89,85	-4,275	1,053E-07
48	0,000003786	0,015	3,9287E-08	172800	0,0029	909,0012	0,265	63,04	-6,85	1,229E-07
72	0,00000373	0,015	3,9287E-08	259200	0,0029	909,0012	0,265	62,24	-7,175	1,2529E-07
96	3,8985E-06	0,015	3,9287E-08	345600	0,0029	909,0012	0,265	67,63	-6,825	1,35778E-07

Для обработки экспериментальных данных, использовался факторный анализ, без привязки к теории о полном факторном анализе, т.к. не имелось возможности провести необходимое количество экспериментов и получить объективные оценки значений всех факторов в процессе эксперимента в ограниченное время. Тип эксперимента 3⁸, с числом факторов, равным 8 и числом уровней, равным 3. Количество опытов N=9 (для каждой временной рамки по 4 эксперимента). Для упрощения построения матрицы факторного эксперимента, была применена Пи-теорема для обезразмеривания анализируемых факторов (таблица 5).

Таблица 3

Численные характеристики исследуемых параметров

	Максимальное значение (Max)	Среднее значение (Ave)	Минимальное значение (Min)
η (м/сек)	4,62425E-06	4,30505E-06	0,00000373
A (м ²)	0,015	0,015	0,015
V (кг/сек)	3,9287E-08	3,9287E-08	3,9287E-08
T (сек)	345600	98280	3600
d (м)	0,0029	0,0029	0,0029
p (кг/м3)	909,0012	909,0012	909,0012
h (м)	0,265	0,265	0,265
ξ_i (кг/м3)	119,08	89,68912	62,24

Таблица 4

Матрица планирования эксперимента

Время	η (м/сек)	A (м)	V (кг/сек)	T (сек)	d (м)	p (кг/м3)	h (м)	ξ_i (кг/м3)	t (град)
1	max	min	max	min	max	min	max	min	max
2	min	min	min	ave	max	max	max	max	max
3	ave	min	min	max	max	min	min	max	max
6	max	ave	max	min	min	min	min	min	ave
9	min	ave	min	ave	min	max	ave	max	ave
12	ave	ave	min	max	min	min	ave	max	ave
24	max	max	max	min	ave	min	max	min	min
48	min	max	min	ave	ave	max	max	max	min
72	ave	max	min	max	ave	min	min	max	min
96	max	min	max	min	max	min	min	min	max

Таблица 5

Численные значения безразмерных коэффициентов для определения диффузии нефти в лед

Время	$\frac{D}{\eta * A^{1/2}}$	$\frac{V * T}{p * A * d}$	$\frac{\xi_i * h}{p * d}$
	зависимый	независимые	
1	0,008692	0,003577	6,256811
2	0,008692	0,003577	6,256811
3	0,008692	0,003577	6,256811
6	0,146402	0,097647	8,76534
9	0,146402	0,097647	8,76534
12	0,146402	0,097647	8,76534
24	0,327995	0,343375	11,97077
48	0,327995	0,343375	11,97077
72	0,327995	0,343375	11,97077
96	0,327995	0,343375	11,97077

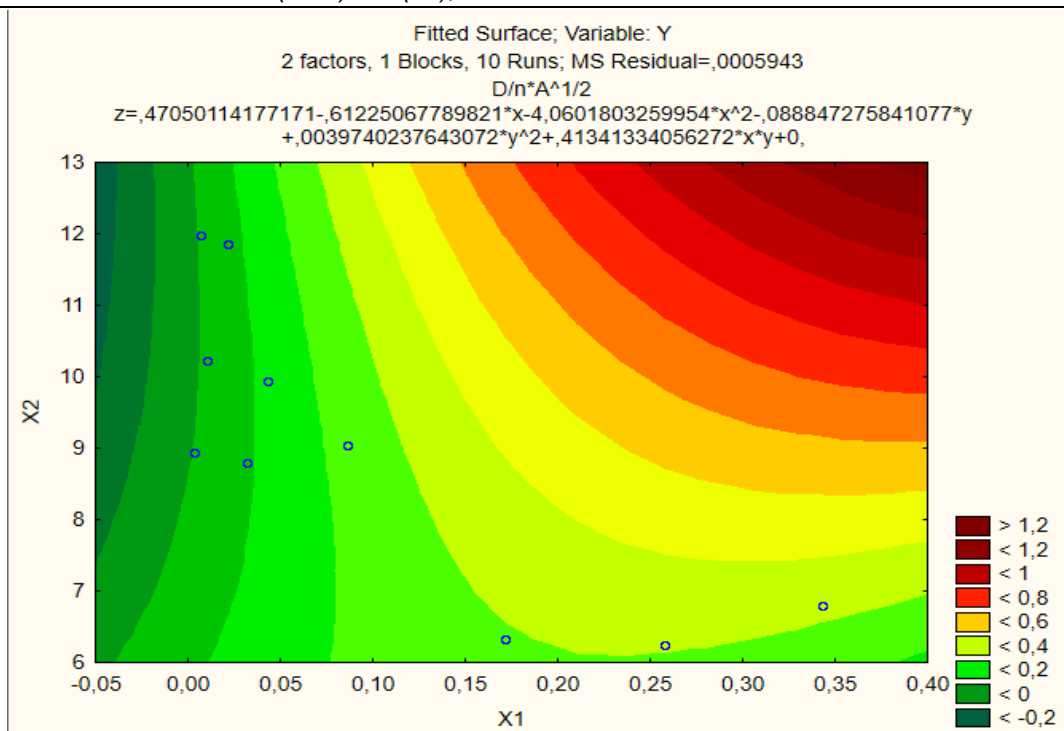


Рис. 3. График плана эксперимента с учетом всех факторов в виде безразмерных комбинаций.

На графике плана эксперимента видно, что уровень значимости по шкале выше 1, что говорит о наличии ненормальности распределения некоторых факторов и автокорреляции. Так и есть, в процессе проведения эксперимента некоторые факторы (такие как d солевых каналов, плотность льда (P), площадь соприкосновения (m^2) и др.) принимались константами и не могли влиять на результат с определенным трендом.

Т.к. в плане эксперимента содержатся параметры, которые мы принимали константами, в программном комплексе statistic нет возможности учесть все факторы при использовании функции центрального плана эксперимента. Поэтому значение объема диффузии мы приняли, как (рис. 4): $D=f(T,t)$,

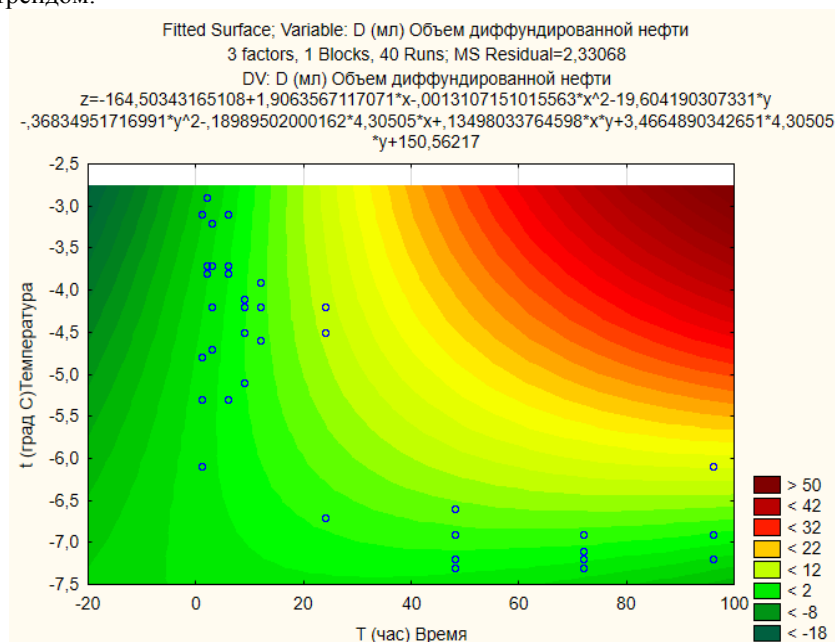


Рис. 4. Иллюстрация полученных данных эксперимента

Учитывая очевидную значимость параметра вязкости нефти на исходные результаты эксперимента, необходимо также проверить важность данного фактора на результирующую диффузии. По данным таблицы 1 (Экспериментальные данные) был построен график-план эксперимента от основных факторов (время, температура, вязкость). Из графика плана эксперимента отмечена значимость времени и влияние показателя вязкости на эксперимент (рис. 5).

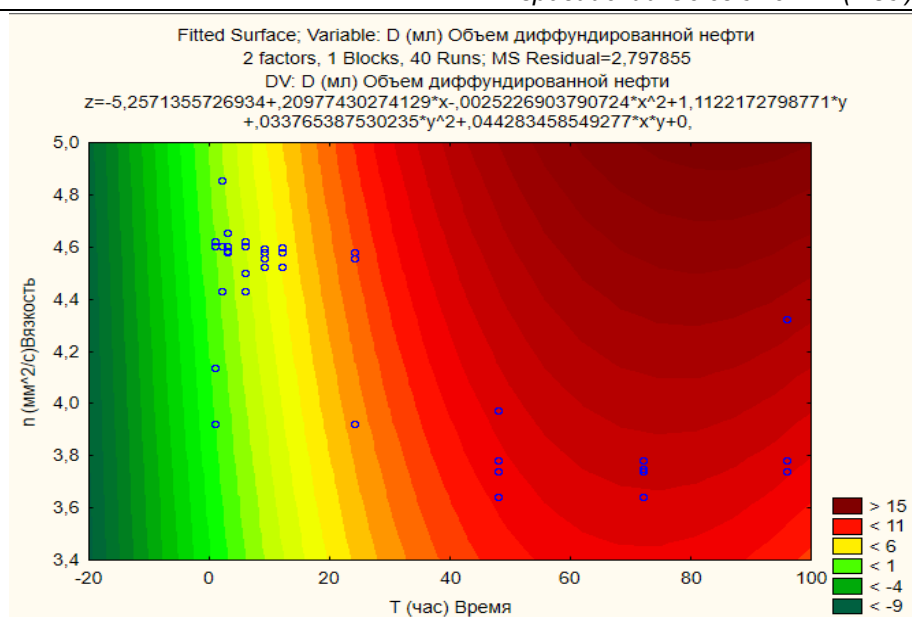


Рис. 5. Иллюстрация зависимости диффузии от вязкости нефти и времени проведения эксперимента.

Статистическая обработка полученных результатов

На основе полученных данных, был построен прогноз в программном комплексе excel с использованием метода наименьших квадратов. Рабочая формула МНК: $Y_{t+1} = a * X + b$, где а и b прогнозные коэффициенты, рассчитываемые по формулам: $a = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\phi} * X) - (\sum_{i=1}^n X * \sum_{i=1}^n Y_{\phi}) / n}{\sum_{i=1}^n X^2 - \sum_{i=1}^n (X^2 / n)}$, $b = \frac{\sum_{i=1}^n Y_{\phi}}{n} - a * \frac{\sum_{i=1}^n X}{n}$, где Y_{ϕ} – фактическое значение диффузии (мл), n – значение выборки. Достоверность данного типа аппроксимации составляет 0,9, что говорит о высокой вероятности адекватности прогнозирования события по данной зависимости: $Y = 3,226 \ln(x) - 1,5462$ (рис. 6).

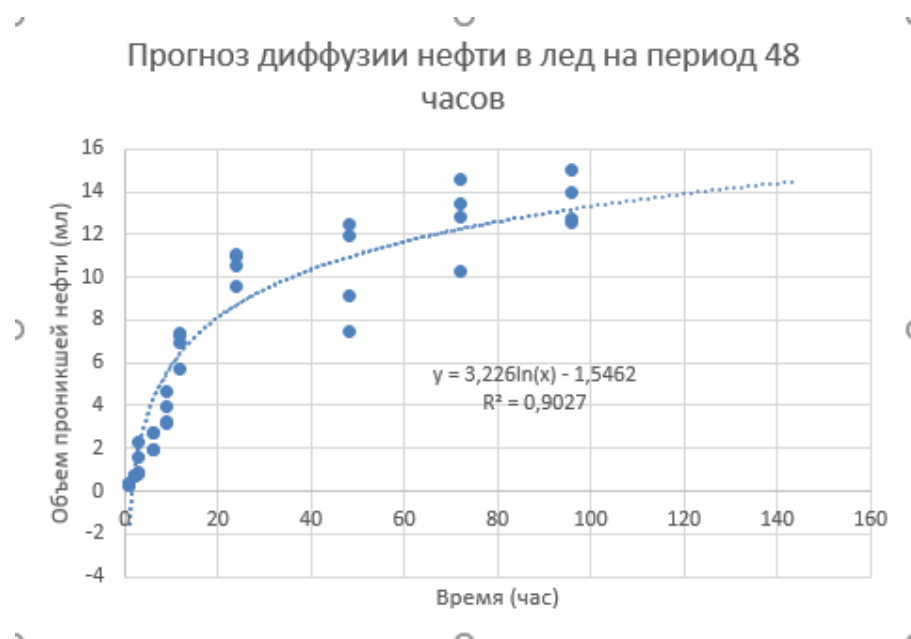


Рис. 6. Иллюстрация результатов прогноза объема диффузии на основе однофакторного регрессионного анализа с использованием метода наименьших квадратов

На начальном этапе обработки полученных в ходе лабораторных работ данных, проводился корреляционный анализ данных, определялась значимость корреляции (коэффициент корреляции Пирсона) объема диффузии от времени, температуры льда и вязкости нефти (рис. 7,8):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{n * \delta x * \delta y},$$

где δ – среднее квадратическое отклонение значений выборки.

В качестве основного коэффициента корреляции использовалась корреляция Спирмена (т.к. результирующий показатель диффузии имеет ненормальное распределение):

$$r = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)},$$

где d_i – разность рангов X_i и Y_i ,
 n – общая исследуемая выборка.

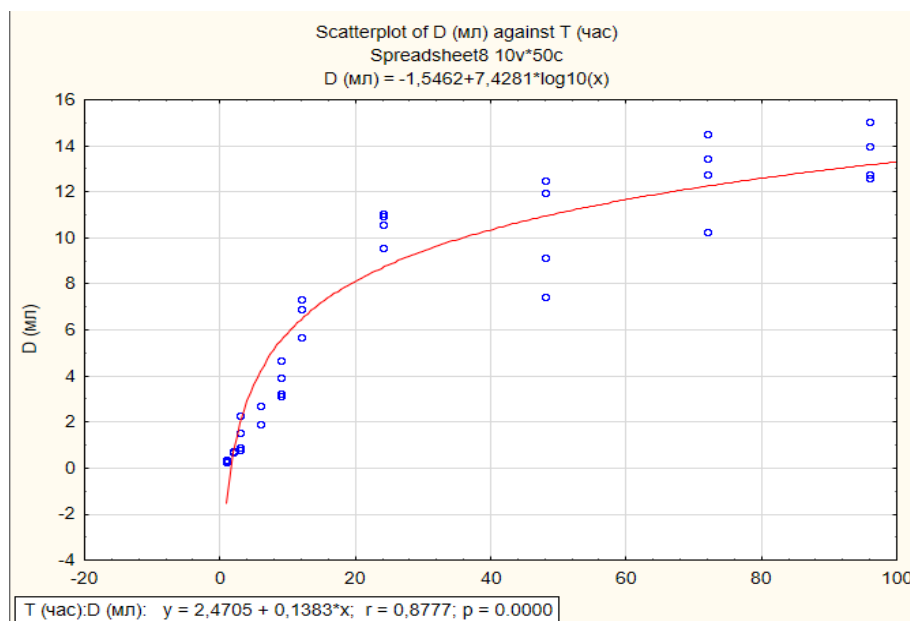


Рис. 7. Иллюстрация корреляционной зависимости диффузии (D) от фактора время (T).

Spearman Rank Order Correlations (Spreadsheet8)							
MD pairwise deleted							
Marked correlations are significant at $p < 0,05000$							
Variable	D (мл)	T (час)	n (мм²/сек)	t (град)	A (м²)	V (мл/час)	E (гр/кг)
D (мл)	1,000000	0,976540	-0,687831	-0,680456			-0,745021
T (час)	0,976540	1,000000	-0,699614	-0,705329			-0,769046
n (мм²/сек)	-0,687831	-0,699614	1,000000	0,900057			0,894143
t (град)	-0,680456	-0,705329	0,900057	1,000000			0,982020
A (м²)					1,000000		
V (мл/час)						1,000000	
E (гр/кг)	-0,745021	-0,769046	0,894143	0,982020			1,000000

Рис. 8. Матрица корреляционного анализа математической модели эксперимента.

Результат корреляционного анализа выборки показал, что в модели имеется автокорреляция, что логично, учитывая расчетные формулы каждого анализируемого фактора. Уровень корреляции диффузии от фактора времени равен 0,87 (высокий), что говорит о прямой зависимости. Уровень корреляции диффузии от фактора температуры отрицательный, что является следствием пассивного эксперимента (нет возможности влиять на ряд факторов при проведении эксперимента).

Эксперимент показал, что в процесс диффузии замедляется во времени, однако полностью не останавливается. Исходя из этого необходимо иметь приблизительные данные о том, как может продол-

жаться процесс. Также для прогнозирования диффузии использовали метод экспоненциального сглаживания (т.к. значения параметров диффузии возрастают не линейно) в пакете программ statistic 12.0. Значений параметров диффузии немного, поэтому и дисперсия в каждой временной рамке небольшая, поэтому была выбрана модель аддитивная. При построении прогностической модели было отмечено, что коэффициент Гамма (отвечающий за сглаживание реальных данных с прогнозными) имеет значение не более 0,3, что говорит о малой репрезентативности выборки и невозможности на ее основе сделать статистически значимый прогноз (рис. 9).

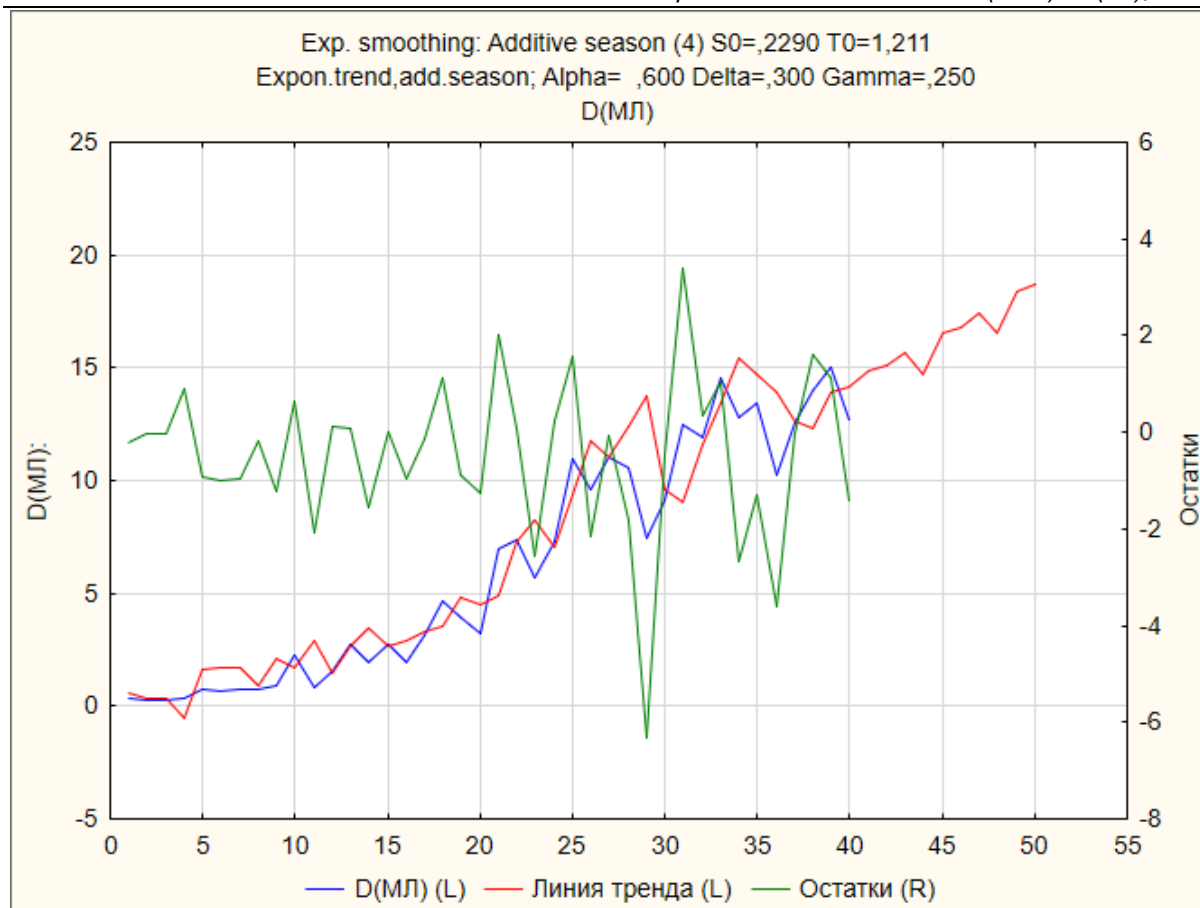


Рис. 9. Иллюстрация прогнозирования диффузии нефти в лед в программном комплексе statistic 12.0.

В данном случае применялся метод экспоненциального сглаживания, т.к. он приемлем для прогнозирования на небольшие промежутки вперед. Основной рабочей формулой метода экспоненциального сглаживания является:

$$U_{t+1} = \alpha * y_t + (1 - \alpha) * U_t,$$

где t – период, предшествующий прогнозируемому (час),

$t+1$ – прогнозный период (час),

U_{t+1} – прогнозируемый показатель,

α – параметр сглаживания,

y_t – фактическое значение исследуемого показателя за предшествующий период,

U_t – экспоненциальная средняя взвешенная для известного периода.

Выводы

В результате проведения эксперимента по изучению процесса диффузии нефти в лед необходимо сделать следующие выводы:

- эксперимент является статистически оправданным, т.к. общая выборка была больше 15,
- результаты моделирования в программе Statistic показали нам зависимость результирующей функции от одного фактора – время. Но, при исключении данного фактора из математической модели, значимость других факторов изменяется,
- в модели присутствует мультикалиниарность при учете всех факторов, что является логичным, т.к. формулы для расчета каждого из параметров содержат данные переменные,

• диффузия прогнозируема по параметру времени, но сложно прогнозируема по другим факторам, связанным с климатическими данными, физико-механическими параметрами нефти,

• данных выборки в одном временном горизонте не достаточно для более полного статистического описания системы и последующей экстраполяции результатов. Для каждого временного отрезка необходимо провести, как минимум по 15 испытаний, далее провести дисперсионный анализ полученных данных.

Список литературы

1. Жариков Е.П. Морская нефть: роль, проблемы освоения. ДВФУ: Арктическая нефть в морской добыче: состояние, проблемы, перспективы. – 2016.
2. Мазур И.И. Иванов О.П. Опасные природные процессы: вводный курс. М.: Экономика, 2004. – 704 с.
3. Богоявленский В.И. Арктический шельф: природно-техногенные угрозы экосистеме при освоении нефти и газа. Международная конференция "Проблемы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктике, включая вопросы аварийных разливов нефти". 2013. – С. 119-135.
4. Dana J. Brunswick B.S. Development of an Arctic oil spill calculator to characterize the fate and transport of oil. USA: University of Alaska Anchorage. 2017. P. 84-88.

5. Yapa P.D. Weerasuriya S.A. Spreading of oil spilled under floating broken ice. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997. - № 123 (8). – P. 676-683.
6. Yapa P.D. Belaskas D.P. Radial spreading of oil under and over broken ice – An experimental study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1993. vol. 20, - № 6, - P. 910-922.
7. Buist T. Belore R. Dickins D. Guarino A. Wang Z. Hackenberg D. Empirical weathering properties of oil in ice and snow. In: *Proceedings Arctic and Marine Oilspill Program (AMOP)*. Canada, Ottawa, Technical Seminar: Environment Canada, - No.32, 2009. Vol. 1, - P. 67-107.
8. Тетельмин В.В. Азев В.А. Нефтегазовое дело: полный курс. Долгопрудный: Издательский дом Интеллект, 2013. 2-е изд. – 800 с.
9. Рябов В.Д. Химия нефти и газа: учебное пособие. М.: ИД «ФОРУМ», 2009. – 336 с.: ил. – (Высшее образование).
10. Garrett R.A. Dynamic modelling of Arctic resource allocation for oil spill response. New York: Master of science, 2016. 68 p.
11. Dickins D.F. Brandvik P.J. Bradford J. Faksness L-G. Liberty L. Daniloff R. Experimental oil spill under ice: remote sensing, oil weathering under Arctic conditions and assessment of oil removal by in-situ burning. USA: International Oil Spill Conference American Petroleum Institute. Svalbard 2006. Washington, 2008.
12. Калинина Т.А. Химия нефти и газа: учеб.-метод. комплекс. Владивосток: Изд-во ДВГТУ. 2008. – С. 20-40.
13. Glover N.W. Response plans for Arctic oil and ice encounters / N.W. Glover, D.F. Dickins // *Proceedings of the 1999 International Oil Spill Conference*. Washington, D.C.: API, 1999. – 10 p.