

DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-360-369
УДК 502.3

МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ИСПАРЕНИЕ ГАЗОКОНДЕНСАТА ПРИ ПОДВОДНЫХ ВЫБРОСАХ

В. В. Солбаков¹, С. Н. Зацепя², А. А. Ивченко²

¹ Федеральное исследовательское учреждение «Информатика и управление» РАН (Москва, Российская Федерация)

² Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 3 апреля 2024 г.

Для цитирования

Солбаков В. В., Зацепя С. Н., Ивченко А. А. Методические аспекты анализа факторов, влияющих на испарение газоконденсата при подводных выбросах // Арктика: экология и экономика. — 2024. — Т. 14, № 3. — С. 360—369. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-360-369.

Процесс испарения газового конденсата при аварийном фонтанировании подводной скважины недостаточно подробно исследован. Влияние различных факторов на размеры зоны интенсивного испарения газового конденсата при фонтанировании мелководной газоконденсатной скважины требует детального рассмотрения. В настоящей работе с использованием математического моделирования проведен анализ этого влияния для скважин с характерными для арктической России параметрами. Расчеты проведены с помощью модели SPILLMOD и модели эволюции лагранжева элемента. Для описания испарения используется псевдокомпонентная модель. Обнаружены значительная зависимость размеров области выхода газа и размеров газового фонтана на поверхности моря от значений параметра вовлечения в модели газового шлейфа и одновременно слабая зависимость от этого параметра размеров зоны интенсивного испарения газового конденсата. Значения массового расхода газового конденсата в сбросе, а также его фракционный состав оказывают заметно большее влияние.

Ключевые слова: аварийное фонтанирование газоконденсатных скважин, испарение газового конденсата, Арктика, математическое моделирование, лагранжевы элементы, вычислительная гидродинамика, SPILLMOD, планы ликвидации разливов нефти, перенос загрязняющих веществ в морской среде.

Введение

В Арктической зоне Российской Федерации сосредоточены значительные запасы углеводородного сырья. Согласно [1], из результатов геолого-разведочных работ следует, что по относительной величине суммарных извлекаемых ресурсов углеводородов в арктических морях сосредоточено 70% всех запасов России, при этом только в Карском море ресурсы оцениваются величиной около 50 млрд т условного топлива (из них более 11 млрд т нефти и конденсата). Их разведка, добыча и транспортировка должны быть обеспечены современными мерами безопасности — как экологической, так и безопасности персонала. Однако, как отмечено

в [2], активное освоение ресурсов углеводородов практически повсеместно сопровождается авариями и катастрофами с выбросами нефти и газа из поисково-разведочных и эксплуатационных скважин, разливами нефти и нефтепродуктов при их хранении и транспортировке танкерами и подводными трубопроводами, а также гибелью людей. Подводные выбросы нефти и природного газа в результате аварий при морском бурении, на подводных установках или при повреждении газопроводов представляют потенциальную опасность для судов, морских сооружений и могут иметь серьезные последствия для окружающей среды и безопасности. В этой связи оценка факторов, влияющих на возможность проведения аварийно-восстановительных работ, представляется необходимой. Среди морских нефтегазо-

© Солбаков В. В., Зацепя С. Н., Ивченко А. А., 2024

вых месторождений следует выделить в отдельную категорию газоконденсатные месторождения в субполярных областях и Арктической зоне России. К наиболее известным месторождениям относятся Штокмановское газоконденсатное в Баренцевом море, Ленинградское, Русановское и другие в Карском море, Каменномысское-море и Юрхаровское в Обской губе, Лунское, Кириновское и Южно-Кириновское на шельфе Охотского моря. Обеспечение безопасности противofонтанных мероприятий при строительстве и эксплуатации газоконденсатных скважин — важная междисциплинарная задача.

Риски, связанные с подводным выбросом газа, включают в себя токсикологическое и взрывоопасное воздействие в районе работ, нарушения остойчивости судов, находящихся в зоне выхода газа на поверхность, изменение экологического режима в ближней зоне. Некоторые газовые компоненты воспламеняются и в критических концентрациях могут вызвать взрыв с последующим возгоранием. Это обстоятельство необходимо учитывать при размещении надводных судов при проведении аварийно-восстановительных работ. Распространение газа и паров нефтяных углеводородов в атмосфере зависит от количества газа и газоконденсата, поступающего на поверхность, распределения источника на морской поверхности, скорости ветра и других параметров атмосферы. Взрывоопасные концентрации регламентируются нормативными документами [3], значение нижнего концентрационного предела взрываемости (НКПВ) по объему для индивидуальных углеводородов находится в диапазоне 0,6—5%.

При расчете взрывоопасных концентраций следует принять во внимание, что на поверхность моря выходит природный газ, а также газовый конденсат (ГК) в жидком состоянии. Таким образом, загазованность области аварийно-восстановительных работ будет обусловлена распространением в приводном слое атмосферы «легкого» газа метана и паров ГК, плотность которых превосходит плотность воздуха («тяжелый» газ). Как отмечают авторы [4], действующая нормативная база вводит единые требования к борьбе с аварийными разливами нефти и нефтепродуктов, к которым по формальному признаку относят и конденсат. Однако отмечаемое ими быстрое выветривание его на поверхности моря, по видимому, потребует внесения некоторых изменений в нормативно-техническую документацию.

Состояние вопроса

Рассмотрение физической картины явлений при фонтанировании мелководной¹ газовой газокон-

денсатной скважины свидетельствует о необходимости учета процессов как в толще воды, так и на поверхности моря. Судьба ГК на поверхности моря, а также область интенсивного испарения в значительной степени определяются специфическим течением в поверхностном слое моря. Увлекаемые этим течением жидкие углеводороды уносятся от места выхода нефтегазовой смеси на поверхность, где образуется тонкий слой нефтепродуктов. Одновременно с движением по поверхности воды происходит испарение газового конденсата с изменением фракционного состава жидкой фазы и изменением потока на испарение в зависимости от расстояния от центра газового фонтана.

Для подробного описания эволюции загрязнения из подводного источника нефтяных углеводородов необходимо использовать набор моделей, содержащий по меньшей мере следующие: модель «ближней зоны», описывающую в том числе дисперсные характеристики капель и пузырьков по завершении струйного истечения флюида, модель плавучего шлейфа в водной толще [5—7], модель распространения нефтяного разлива на поверхности моря, которая может описывать эволюцию поверхностного загрязнения в различных приближениях [8—10], модель переноса газа в атмосфере [11], а также модель распространения пассивной плавучей или нейтральной примеси в водной толще [12; 13].

Подводный пузырьковый шлейф

Исследование подводных нефтегазовых выбросов крайне ограничено. Несколько контролируемых экспериментов было проведено норвежцами в рамках программы «Deerspill» [14] и ранее рядом исследователей [15—17]. Экспериментальные исследования подводных выбросов газа были проведены для расходов газа от 10^{-3} до 10 кг/с, в то время как дебиты по газу промышленных скважин составляют 10^2 — 10^3 кг/с. Глубины воды в экспериментах не превышают 10 м, а для промышленных скважин глубина моря составляет сотни метров. Отметим обзор современных данных о физике подводных выбросов газа, причинах их возникновения и рисках, связанных с этим феноменом [18]. На основании результатов экспериментов и теоретических представлений о формировании турбулентных струй и свободно конвективных движений в атмосфере и океане были предложены математические модели подводного пузырькового шлейфа [6; 16; 19]. Они относятся к категории моделей с сосредоточенными параметрами или интегральных моделей, в основу которых положено предположение о подобии горизонтального распределения характеристик — скорости и плотности переносимой субстанции вдоль оси шлейфа. Таким образом, задача сводится к решению системы обыкновенных нелинейных дифференциальных уравнений. Физическая основа формирования пузырькового шлейфа представляет достаточно хорошо установленной либо из тео-

¹ В настоящей работе мы ограничиваем рассмотрение условиями глубины моря в пределах от 50 до 200 м, когда процесс растворения пузырьков газа не оказывает значительного влияния на плавучесть пузырькового шлейфа, начальный импульс газовой струи гасится и формируется пузырьковый шлейф.

рии, либо из экспериментов, но выбор фактических значений параметров часто вызывает сомнения.

Ряду параметров, используемых в теоретических моделях, присваиваются «стандартные» значения, основанные на экспериментальных наблюдениях [20]. К ним относятся показатель политропы (адиабатический процесс или изотермический), скорость проскальзывания пузырьков газа в воде, параметр вовлечения, отношение радиуса распределения плотности и скорости в пузырьковом шлейфе, коэффициент усиления импульса [21]. Коэффициент вовлечения, как правило, предполагается постоянным для всего шлейфа от поверхности до дна. Эксперименты с малыми расходами газа показали неплохое соответствие результатов теоретических расчетов при значениях коэффициента вовлечения $\alpha = 0,065 \div 0,1$, однако в [20] отмечено, что коэффициент вовлечения должен увеличиваться при увеличении расхода газа, и проведено сравнение экспериментальных наблюдений с аппроксимацией [21], а в [6] и [22] на основании анализа экспериментальных данных предложены новые аппроксимации зависимости коэффициента вовлечения от расхода газа.

По [6] параметр вовлечения воды в пузырьковый шлейф α зависит от расхода газа при нормальных условиях Q_{nc} по соотношению

$$\alpha = 0,0125 \left\{ 0,3 \left[\lg Q_{nc} \left(\text{м}^3 / \text{с} \right) + 3 \right] + 0,055 \left[5 - \lg Q_{nc} \left(\text{м}^3 / \text{с} \right) \right] \right\}. \quad (1)$$

Согласно работе [22]

$$\alpha = 0,0148 \ln \beta + 0,101, \quad (2)$$

где безразмерный параметр $\beta = g' Q_{nc} / (H_d w_s^3)$, $g' = g(\rho_w - \rho_g) / \rho_w$, ρ_w, ρ_g — плотность воды и газа соответственно; H_d — глубина моря; $w_s = 0,35$ м/с — скорость проскальзывания пузырьков газа.

Для глубин порядка 100 м и расходов газа порядка 150 м³/с параметр β примерно равен 350. Таким образом, для рассматриваемых нами пузырьковых шлейфов с характерными расходами газа от 60 до 180 м³/с [23] коэффициент вовлечения по [22] составляет 0,19, что примерно соответствует оценке [6] по соотношению (1).

Согласно [22], коэффициент усиления импульса за счет переноса турбулентными пульсациями в пузырьковом шлейфе на основании результатов экспериментов может быть параметризован как

$$\gamma = \begin{cases} 1,118\beta^{-0,181}, & \beta < 2 \\ 1, & \beta \geq 2 \end{cases}. \quad (3)$$

Соотношение (3) соответствует более ранним предположениям [21; 24], что в крупномасштабных пузырьковых шлейфах поток импульса, переносимый турбулентностью, пренебрежимо мал по сравнению с потоком, переносимым средним течением.

Параметр λ , характеризующий отношение дисперсий распределения скорости и плотности в шлейфе, по результатам численного моделирования [25] может быть выбран примерно равным 0,7. Интегральные модели шлейфа демонстрируют незначительное влияние параметра λ на ширину и скорость движения на оси шлейфа [21; 24; 26].

Предположение об изотермичности процесса выхода пузырькового шлейфа на поверхность может рассматриваться как консервативная оценка скорости выхода газовой смеси на поверхность, так как уменьшение температуры газа при адиабатическом расширении можно трактовать как уменьшение плавучести по сравнению с изотермическим процессом. Численные расчеты [16] показали, что выбор показателя политропы, равного 1, приводит к наибольшим значениям скорости выходящего на поверхность потока и минимальному радиусу фонтана. Заметим, что использование уравнения состояния идеального газа для расчета расширения пузырьков газа для мелководных скважин (глубина моря до 200 м) приводит к ошибкам в расчете плотности газа порядка 5% [18].

Влияние растворения пузырьков газа по мере подъема к поверхности на характеристики шлейфа исследовалось в [22] и [27]. В [18] приведено время подъема t_{rise} пузырьков в шлейфе, зависящее от глубины выброса H и объемного расхода газа Q_s в источнике (на глубине):

$$t_{rise} = C \left[H^4 / (g Q_s) \right]^{1/3}. \quad (4)$$

Оценки [27] показали, что при расходах газа от 10 до 50 кг/с и глубинах моря от 100 до 300 м растворение пузырьков газа в диапазоне от 1 до 10 мм незначительно влияет на динамику шлейфа, однако при подъеме с глубины 300 м маленькие пузырьки газа до поверхности не доходят.

О роли стратификации

Изменение импульса в пузырьковом шлейфе обусловлено как влиянием положительной плавучести пузырьков газа, так и стратификацией водной толщи. В стратифицированной жидкости, вообще говоря, есть области, где два эти фактора уравновешиваются. Обычно считается [28], что расстояние L , на котором пузырьковый шлейф трансформируется в интрузию, равно $L = c B^{1/4} N^{-3/4}$, где $B = g' Q_{gnc}$ — поток плавучести; $g' = g(\rho_w - \rho_g) / \rho_w \approx g$ — редуцированное ускорение силы тяжести; ρ_w, ρ_g — плотность воды и газа; N — частота Вэйсала — Брента, характеризующая устойчивость водной толщи. Коэффициент c зависит от относительных скоростей пузырьков и шлейфа. Типичный диапазон составляет 0,4—4,5, причем большие значения соответствуют большим скоростям в факеле [29]. В большинстве случаев, характерных для условий российского арктического шельфа, ожидаемых дебитов газа Q_{gnc} от 5 до 15 млн м³/сут при строительстве скважин, глубинах до 200 м, оценкам ча-

стоты Вэйсаля — Брента $N \approx 10^{-2}$ для наибольшей устойчивости водной толщи в летне-осенний период, высота интрузии составит не менее 300—400 м.

В [30] приведено похожее выражение $L = \left[B_0 / (4\pi\alpha^2 N^3) \right]^{1/4}$, где L — высота потери импульса шлейфа (высота интрузии) уменьшается с увеличением значения коэффициента вовлечения.

Радиальное течение

Первая теоретическая модель формирования радиального течения в месте выхода газовой воды на поверхность моря предположительно была предложена в [16] и позже развита в исследовании взаимодействия пузырькового шлейфа с поверхностью моря в [19]. Модель основана на законах сохранения массы и импульса в струе на поверхности моря и предполагает вовлечение в струю из окружающей неподвижной жидкости. Сравнение модели с экспериментальными данными [16] показало, что хорошее соответствие наблюдается лишь на расстояниях порядка 10—20 радиусов фонтана, а на периферии течение заглубляется и фактически исчезает с поверхности, подтверждая утверждение Топхэма [15] о конечности зоны влияния фонтана, которая ограничена «радиусом Топхэма», зависящим от расхода газа и глубины водоема. Сравнение модели [16] с моделью [31] показало, что первая хорошо описывает течение для радиусов $r > 2b_f$, где b_f — радиус фонтана, однако в центральной области скорость радиального осесимметричного течения с достаточной точностью описывается моделью [31]. Сравнение скоростей радиального течения в экспериментах [17] указывает на то, что коэффициент вовлечения окружающей воды в горизонтальный поток, инициируемый фонтаном, увеличивается по мере увеличения расхода газа и, соответственно, высоты фонтана и скорости радиального течения. По мнению, высказанному в [16], коэффициент вовлечения для горизонтального потока жидкости должен примерно соответствовать коэффициенту вовлечения в пузырьковый шлейф.

Испарение смеси жидких нефтяных углеводородов сложного состава

ГК представляет собой сложную смесь различных углеводородов, большая часть которых имеет температуры кипения до 200°C. Плотность ГК, как правило, чуть больше 700 кг/м³. Испарение ГК, как и других нефтепродуктов, исследовано в существенно меньшем объеме, чем испарения гомогенных жидкостей типа воды или чистых углеводородов. Обзор эволюции исследований различных типов нефти и нефтепродуктов приведен в монографии М. Фингаса с коллегами [32]. Автор делает вывод, что в отличие от гомогенных жидкостей испарение смеси нефтепродуктов в меньшей степени регулируется пограничным слоем атмосферы, но существенно зависит от фракционного состава нефтепродукта. Обработка значительное коли-

чество экспериментальных данных, Фингас [32] пришел к выводу, что для расчетов испарения различных типов нефти и отдельных нефтепродуктов удобно использовать данные дистилляции. Было отмечено, что зависимость потери массы от времени для большинства нефтепродуктов с узким диапазоном температур кипения фракций хорошо описывается как квадратный корень от времени, а для нефтепродуктов с широким диапазоном температур кипения фракций — как логарифм времени испарения. Данные дистилляции были соотнесены со скоростями испарения, полученными экспериментальным путем. Значение массовой доли фракций (%) с температурой кипения до 180°C использовалось для расчета потери массы на испарение от времени. Сотни уравнений для отдельных конкретных типов нефтепродуктов были получены опытным путем на основании измерений потерь массы 20 г нефтепродуктов, предварительно помещенных в типовые чашки Петри.

По Фингасу [32] количество M [%] испарившегося из чашки Петри нефтепродукта рассчитывается так:

$$M [\%] = 0,165 [\%D] \ln t, \quad (5)$$

где $\%D$ — процент нефтепродукта (по массе), отгоняемого при 180°C, t — время, мин.

Важно понимать, что уравнение (5) — результат обработки данных экспериментов испарения нефтепродуктов в чашке Петри, в которых площадь испарения соответствует кругу с эквивалентным диаметром примерно 133 мм. В разное время для учета сложного состава жидких нефтепродуктов были построены более сложные модели. Например, в модели испарения, приведенной в [33] и [34], в качестве параметров используется диаметр разлива и молярная масса «летучей» части разлива. Детальный анализ изменения химического состава и физико-химических свойств нефти в процессе испарения свидетельствует о разнообразии изменений [35]. Современные модели с использованием псевдокомпонентов позволяют хорошо описывать процесс испарения реального нефтепродукта [10; 36; 37].

Методы исследований

В [37] для определения зоны интенсивного испарения для задания характеристик фонтана и скорости течений на поверхности моря вблизи фонтана использовались модели [6] и [16], а моделирование испарения проводилось на основе CFD модели SPILLMOD [10], а также лагранжевыми элементами [8; 9]. При этом в обоих случаях для расчета испарения летучих нефтяных углеводородов используется представление смеси в виде псевдокомпонентов [38—40]. В [37] представлены результаты оценки зон интенсивного испарения ГК при фонтанировании мелководной ГК скважины в условиях, когда можно пренебречь некоторыми процессами, напри-

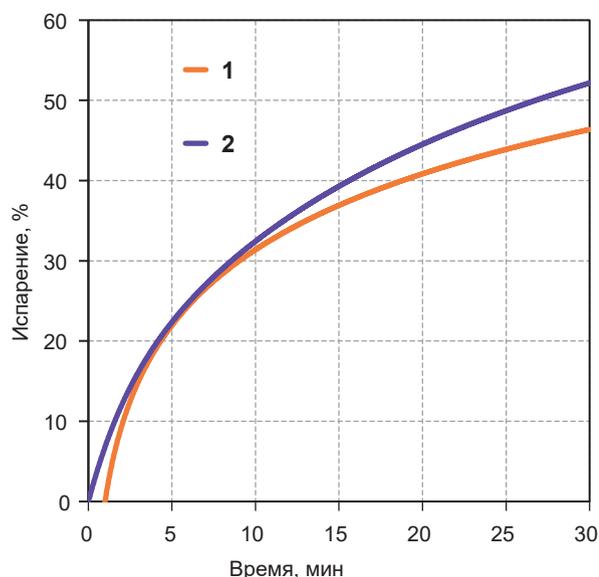


Рис. 1. Испарение ГК. Кривая 1 построена авторами по данным [32], кривая 2 – результат расчетов испарения для многокомпонентной смеси
 Fig. 1. Gas condensate evaporation. Curve 1 constructed by the authors according to [32], curve 2 is the result of evaporation calculations for a multicomponent mixture

мер, растворением газа в водной толще. В качестве характеристик, ограничивающих зоны интенсивности испарения, выбраны следующие критерии: область, в которой расход на испарение составляет 80% и 90% расхода газового конденсата при аварийном фонтанировании, область, в которой поток на испарение превышает 10^{-6} кг/(с·м²). Первый критерий означает, что значительная часть компонентов испарится внутри обозначенных зон, а остаток на поверхности моря будет содержать преимущественно компоненты с наиболее высокой температурой кипения, а второй критерий предполагает малое значение количества нефтяных углеводородов, поступающих в атмосферу за счет испарения с единицы площади.

Как отмечено выше, коэффициент вовлечения является важным параметром при оценке параметров струйных и свободно конвективных потоков. Он имеет довольно широкий диапазон возможных значений от близкого к нулю до, возможно, 0,2 и более [20], при этом полной определенности в выборе его значения на сегодня нет.

В настоящей работе авторы провели оценки размеров зоны интенсивного испарения ГК для двух значений параметра вовлечения, двух глубин аварийного выброса, двух газовых факторов при едином дебите по газу, для двух составов ГК.

Для оценки адекватности используемой псевдокомпонентной модели испарения ГК [38] было выполнено сравнение с параметризацией испарения из [32]. С этой целью был проведен вычислительный эксперимент по расчету испарения ГК в условиях, соответствующих испарению из чашки Петри. Состав ГК был представлен в виде смеси 17 псевдо-

компонентов [37] согласно данным дистилляции² ГК Лунского месторождения.

Толщина слоя нефтепродукта в чашке Петри, соответствующая объему 20 г ГК, в начале эксперимента составляет 1,9 мм. На рис. 1 приведены результаты расчетов испарения ГК по формуле (5) в соответствии с [32] (кривая 1) и расчетов испарения многокомпонентной смеси по модели [38] (кривая 2). Следует отметить, что многокомпонентная смесь (17 компонентов) из [37] в представлении [32] задается всего двумя параметрами — типом нефтепродукта (тип зависимости — логарифмической или степенной) и массовым содержанием фракций с температурой кипения до 180°C.

Сравнение представленных на рис. 1 кривых свидетельствует об удовлетворительном совпадении количества испарившихся нефтяных углеводородов в обоих случаях на временном интервале порядка 10—20 мин. Как показано в [39], испарение из тонких слоев нефтепродуктов приводит к изменению фракционного состава, плотности и вязкости остатка на поверхности моря существенно быстрее, чем для более толстых слоев.

Результаты расчетов

Для оценки чувствительности размеров области интенсивного испарения к выбору коэффициента вовлечения в пузырьковый шлейф были выбраны два значения — 0,1 и 0,215. Последнее значение получено по соотношению (1) для расхода газа, равному 15 000 000 м³/сут, при этом расход ГК составляет 1500 м³/сут. Также для первых двух вариантов (сценарии А и В) были проведены расчеты по сценариям Е и F, в которых взято вдвое большее содержание ГК, при этом расход ГК составляет 3000 м³/сут. При исследовании чувствительности к фракционному составу ГК использовались составы, в которых температуры кипения каждой из фракций увеличены/уменьшены на 20°C (что на графике отгонки соответствует сдвигу всей кривой вправо/влево) и обозначены знаками «-» и «+» соответственно [37]. Перечень сценариев расчетов и значения параметров сценариев приведены в табл. 1. Там же помещены следующие расчетные параметры: расстояние 80%-ного испарения, площадь 80%-ного испарения, расстояние 90%-ного испарения, площадь 90%-ного испарения, расстояние до границы зоны, поток на испарения в которой превышает 10^{-6} кг/(с·м²), а также площадь этой зоны.

На рис. 2а и 2в приведена зависимость удельного потока испарения ГК от расстояния до центра фонтана. На рис. 2б и 2г представлены интегральные потоки на испарение внутри круговой области, определенной расстоянием от центра фонтана, нормированные на расход ГК в источнике (в кг/с). Результаты расчетов для «более летучего» ГК (обозна-

² Standard Assay Lunscoe condensate: Report Nr. 12002/0000909, April 28, 2009. Handled by R. A. van Rijswijk.

Таблица 1. Параметры модели пузырькового шлейфа и зон интенсивного испарения

Table 1. Parameters of the bubble plume model and intensive evaporation zones

№	Характеристики газового фонтана					Характеристики зон интенсивного испарения					
	Расход ГК, м ³ /сут	Глубина моря, м	Параметр вовлечения в струю, α	Радиус шлейфа у поверхности, м	Скорость в шлейфе у поверхности, м/с	Расстояние 80%-ного испарения, м	Площадь 80%-ного испарения, км ²	Расстояние 90%-ного испарения, м	Площадь 90%-ного испарения, км ²	Расстояние до границы зоны с потоком на испарение более 10 ⁻⁶ кг/(с·м ²), м	Площадь зоны с потоком на испарение более 10 ⁻⁶ кг/(с·м ²), км ²
A	1500	100	0,1	11,6	5,6	180	0,100	369	0,426	414	0,537
B	1500	100	0,215	25	3,4	186	0,101	370	0,422	414	0,531
C	1500	50	0,1	5,8	8,4	179	0,100	366	0,420	411	0,530
D	1500	50	0,215	12,5	5,1	181	0,101	366	0,419	411	0,529
E	3000	100	0,1	11,6	5,6	253	0,199	519	0,845	585	1,073
F	3000	100	0,215	25	3,4	257	0,200	516	0,829	581	1,053
A-	1500	100	0,1	11,6	5,6	110	0,036	212	0,140	326	0,332
B-	1500	100	0,215	25	3,4	121	0,038	218	0,141	328	0,330
A+	1500	100	0,1	11,6	5,6	300	0,281	652	1,334	491	0,756
B+	1500	100	0,215	25	3,4	302	0,279	627	1,227	489	0,743

чен индексом «-») и «менее летучего» ГК (обозначен индексом «+») приведены на рис. 2г и в табл. 1.

Обсуждение

Для всех вариантов расчетов наблюдается значительное падение потока на порядок величины в пределах 170 м и на два порядка в пределах 300 м. По мере увеличения расстояния заметно, что значения потоков сгруппировались по количеству ГК в сбросе, для меньшего содержания ГК в сбросе поток 10⁻⁶ кг/(с·м²) на расстоянии немногим более 400 м, а для вдвое большего сброса — на расстоянии немногим менее 600 м (см. также табл. 1). Для потока на испарение отметим следующую особенность: при значении коэффициента вовлечения в пузырьковый шлейф, равном 0,1, в сценариях А и С получаются большие значения скорости течений на поверхности и, как следствие, большая площадь лагранжева элемента, что обеспечивает более быстрое испарение легколетучих фракций по сравнению с вариантами В и D при значении коэффициента вовлечения в шлейф 0,215 согласно формуле (1). Испарение в размере 80% расхода в источнике во всех вариантах (А—F) достигается на расстоянии в пределах от 180 до 260 м, а в размере 90% расхода в источнике во всех вариантах (А—F) достигается на расстоянии в пределах от 360 до 520 м. Площадь области, в которой поток на испарение превышает 10⁻⁶ кг/(с·м²), приблизительно составляет 0,54 км² для содержания

100 см³ ГК в 1 м³ газа в сбросе и 1,1 км² при содержании 200 см³.

Зоны интенсивного испарения ГК с более «летучим» фракционным составом (обозначены знаком «-» на рис. 2 и в табл. 1) ожидаемо оказываются более компактными по сравнению с «базовым» вариантом (А и В без дополнительных индексов), аналогичные результаты наблюдаются при сравнении «базового» варианта и менее летучего состава ГК (обозначены индексом «+»). При рассмотрении значения удельного расхода на испарение ГК, равного 10⁻⁶ кг/(с·м²), оказывается, что расстояние, на котором удельный расход снижается до обозначенного уровня для вариантов А+ и В+ (менее «летучий» состав), находится между расстояниями для вариантов А—В и Е—F.

Результаты моделирования лагранжевыми элементами показывают, что испарение 80% количества ГК в источнике при фонтанировании (типичный расход приблизительно равен около 0,017 м³/с) наблюдается в пределах 180 м от места выхода пузырькового шлейфа. Для вдвое большего расхода ГК расстояние составляет приблизительно 250 м. При этом выбор параметра вовлечения в пузырьковый шлейф, а также глубина моря в месте сброса не оказывают значительного влияния на размеры области интенсивного испарения. Как показали расчеты, размеры области интенсивного испарения существенным образом зависят от количества сбрасываемого

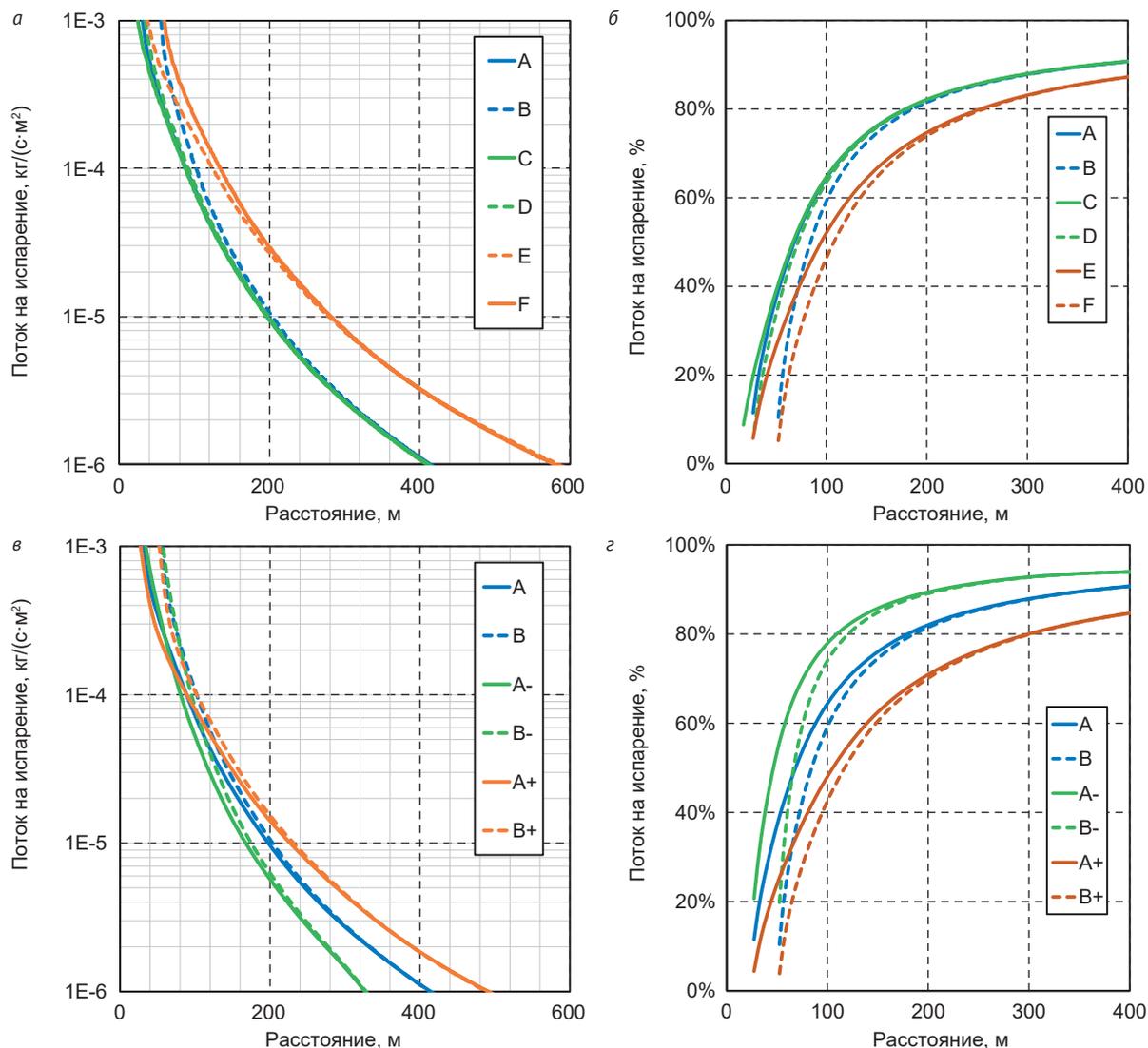


Рис. 2. Зависимость испарения от расстояния до центра фонтана: а – удельный поток испарения, б – нормированный поток на испарение, в–г – для вариантов ГК различного фракционного состава

Fig. 2. Dependence of evaporation on the distance to the center of the blowout: а – specific evaporation flow, б – normalized evaporation flow, в–г – for variants of gas condensate of different fractional composition

сываемого ГК и фракционного состава жидких нефтяных углеводородов.

Закключение

В настоящей работе проведен анализ факторов, влияющих на распространение жидких нефтяных углеводородов (ГК) при фонтанировании мелководной газовой газоконденсатной скважины. В качестве исходных данных были взяты параметры пластового продукта, характерные для газоконденсатных месторождений российской Арктики и субполярных областей. В результате моделирования с использованием лагранжевых элементов в поле поверхностных течений [16] были получены оценки размеров зон интенсивного испарения газового конденсата. Можно сделать вывод, что выбор параметра вовлечения в струю имеет ограниченное влияние на размеры зоны интенсивного испарения ГК.

Влияние же содержания ГК в сбросе (GOR — gas oil ratio) проявляется в большей степени, также как и влияние фракционного состава ГК. Дополнительно следует отметить, что аварийное фонтанирование мелководной скважины приводит к действию на поверхности моря двух источников поступления нефтяных углеводородов в атмосферу: первый локализуется в месте выхода газа в пределах первых десятков метров вблизи фонтана, второй (испарение газоконденсата) распределен в пределах 100—300 м вблизи фонтана.

При проведении оценок для скважин конкретного месторождения, безусловно, потребуется использование их индивидуальных характеристик, включая конкретный фракционный состав ГК, стратификации водной толщи, зависящей от сезона, наличия течений различной природы. Кроме того, может потребоваться использование более совершенной

модели пузырькового шлейфа в водной толще и модели движения жидкости в водной толще в целом, возможно, построение для этих целей CFD модели. Проведенное исследование имеет приложение в области обеспечения безопасности аварийно-спасательных работ при ликвидации фонтанирования газо-газоконденсатных скважин.

Литература/References

1. Патин С. А. Нефть и экология континентального шельфа: В 2 т. — Т. 1. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Всерос. науч.-исслед. ин-т рыб. хоз-ва и океанографии, 2017. — 326 с.
2. Bogoyavlenskiy V. I. Emergency Situations in Developing Oil and Gas Resources in the Arctic and the Ocean. Arctic: Ecology and Economy, 2014, no. 4 (16), pp. 48—59. (In Russian).
3. ГОСТ Р 58329-2018. Национальный стандарт Российской Федерации. Правила эксплуатации магистральных конденсатопроводов и продуктопроводов. — Утв. и введен в действие приказом Росстандарта от 25 декабря 2018 г. № 1134-ст.
4. Safonov V. S., Mel'nikov A. V., Ganaga S. V. Methodological aspects of the analysis of emergency processes on underwater gas pipelines. Vesti gazovoi nauki [News of gas science], 2015, no. 2, pp. 155—163. (In Russian).
5. Архипов Б. В., Котеров В. Н., Солбаков В. В. Модель АКС для прогноза распространения промышленных сбросов с морских буровых платформ / Вычисл. центр им. А. А. Дородницына РАН. — М., 2000. — 72 с.
6. Koterov V. N., Arkhipov B. V., Solbakov V. V., Jurezanskaya Ju. S. Application of mathematical methods for the analysis and assessment of environmentally significant events in the event of a large-scale accident of an underwater gas pipeline. Dorodnicyn Computing Centre, RAS. Moscow, 2007, 74 p. (In Russian).
7. Boufadel M. C., Socolofsky S., Katz J., Yang D., Daskiran C., Dewar W. A review on multiphase underwater jets and plumes: Droplets, hydrodynamics, and chemistry. Reviews of Geophysics, 2020, vol. 58, no. 3, p. e2020RG000703.
8. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В., Становой В. В. О некоторых инженерных оценках параметров нефтяного разлива в море // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 2. — С. 208—211.
9. Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V., Stanovoy V. V. Some engineering estimations of oil spill parameters in the marine environment. Problemy Arktiki i Antarktiki [Arctic and Antarctic Research], 2018, vol. 64, no. 2, pp. 208—221. DOI: 10.30758/0555-2648-2018-64-2-208-221. (In Russian).
10. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В., Становой В. В. Метод моделирования последствий сверхпродолжительных аварий на объектах нефтедобычи в Арктическом регионе // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018. — Т. 64, № 4. — С. 439—454.
11. Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V., Stanovoy V. V. Method of modeling the consequences of long-term accidents at oil production facilities in the Arctic region. Problems of the Arctic and Antarctic, 2018, vol. 64, no. 4, pp. 428—443. (In Russian).
12. Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V. SPILLMOD — A CFD model for information support of marine oil spill response. J. of Oceanological Research, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 72—105.
13. Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 448 с.
14. Berljand M. E. Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1975, 448 p. (In Russian).
15. Shiau B. S., Juang J. J. Numerical study on the far field diffusion of ocean dumping for liquid waste. The Proceedings of the... International Offshore and Polar Engineering Conference. [S. l.], 1998, vol. 2, pp. 327—334.
16. Solbakov V. Application of mathematical modeling for water environment problems. Jyvaskyla, Univ. of Jyvaskyla, 2004, 66 p. (+included articles).
17. Johansen Ø., Rye H., Cooper C. DeepSpill—field study of a simulated oil and gas blowout in deep water. Spill Science & Technology Bull., 2003, vol. 8, no. 5—6, pp. 433—443.
18. Topham D. R. Hydrodynamics of an oil well blowout, Beaufort Sea. Institute of Ocean Science Tech. Rep., 1975, vol. 33.
19. Fanneløp T. K., Sjøen K. Hydrodynamics of underwater blowouts Norwegian Maritime Res, 1980, 8 (4), pp. 17—33.
20. Milgram J. H., Burgess J. J. Mean flow in round bubble plumes. Applied Ocean Research, 1984, vol. 6, no. 1, pp. 40—44.

18. Olsen J. E., Skjetne P. Current understanding of sub-sea gas release: A review. *The Canadian J. of chemical engineering*, 2016, vol. 94, no. 2, pp. 209—219.
19. Friedl M. J., Fanneløp T. K. Bubble plumes and their interaction with the water surface. *Applied Ocean Research*, 2000, 22, pp. 119—128.
20. Fanneløp T. K., Bettelini M. Very Large Deep-Set Bubble Plumes From Broken Gas Pipelines. *Petroleumstilsynet*, 2007, 70 p.
21. Milgram J. H. Mean flow in round bubble plumes. *J. Fluid Mech.*, 1983, 133, pp. 345—376.
22. Neto I. E. L. Bubble plume modelling with new functional relationships, *Journal of Hydraulic Research*, 2012, vol. 50, 1, pp. 134—137. DOI: 10.1080/00221686.2011.651278.
23. Мансуров М. Н. Управление состоянием морской среды при освоении нефтегазовых ресурсов: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — Владивосток, 1992. — 34 с.
Mansurov M. N. Management of the marine environment in the development of oil and gas resources: Abstract of the dissertation ... Dr. of Engineering Science. Vladivostok, 1992, 34 p. (In Russian).
24. Wüest A., Brooks N. H., Imboden D. M. Bubble plume modeling for lake restoration. *Water Resour. Res.*, 1992, vol. 28, 12, pp. 3235—3250.
25. Buscaglia G. C., Bombardelli F. A., García M. H. Numerical modeling of large-scale bubble plumes accounting for mass transfer effects. *Intern. J. of Multiphase Flow*, 2002, vol. 28, iss. 11, pp. 1763—1785. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(02\)00075-7](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(02)00075-7).
26. Socolofsky S. A., Crouse B. C., Adams E. E. Multiphase plumes in uniform, stratified, and flowing environments. *Environmental Fluid Mechanics. Theories and Applications*. H. Shen, A. Cheng, K.-H. Wang, M. H. Teng, C. Liu (Eds.). ASCE, Reston, 2002, 467 p.
27. Einarsrud K. E., Brevik I. Kinetic Energy Approach to Dissolving Axisymmetric Multiphase Plumes. *J. Hydraul. Eng.*, ASCE, 2009, 135, pp. 1041—1051.
28. Sigurðardóttir A. et al. Radial spreading of turbulent bubble plumes. *Philosophical transactions. Series A, Mathematical, physical, and engineering sciences*, 2020, vol. 378, 2179, p. 20190513. DOI: 10.1098/rsta.2019.0513.
29. Asaeda T., Imberger J. Structure of bubble plumes in linearly stratified environments. *J. Fluid Mech.*, 1993, 249, pp. 35—57. DOI: 10.1017/S0022112093001065.
30. Chu Sh., Prosperetti A. Bubble plumes in a stratified environment: Source parameters, scaling, intrusion height, and neutral height. *Physical Review Fluids*, 2017, 2. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.2.104503.
31. Milgram J. H., Van Houten R. J. Plumes from subsea well blowouts. *Proceedings of the 3rd International Conference BOSS*, 1983, vol. 1, pp. 659—684.
32. Fingas M. *Handbook of Oil Spill Science and Technology*. John Wiley & Sons, 2015, 693 p. DOI: 10.1002/9781118989982.
33. Mackay D., Buist I., Mascarenhas R., Paterson S. Oil spill processes and models. *Environmental Protection Service, Canada*, 1980. Report EE-8.
34. Reed M., Gundlach E., Kana T. A coastal zone oil spill model: development and sensitivity studies. *Oil and Chemical Pollution*, 1989, vol. 5, no. 6, pp. 411—449.
35. Payne J. R., Kirstein B. E., McNabb Jr. G. D., Lambach J. L., Redding R., Jordan R. E. et al. Multivariate analysis of petroleum weathering in the marine environment—sub Arctic. *Environmental Assessment of the Alaskan Continental Shelf, OCEAP, Final Report of Principal Investigators*, 1984, vol. 21, p. 690.
36. Ткалин А. В. Испарение нефтяных углеводородов из пленок на гладкой поверхности моря // *Океанология*. — 1986. — Т. 26, № 4. — С. 628—630.
Tkalin A. V. Evaporation of petroleum hydrocarbons from films on the smooth surface of the sea. *Okeanologiya [Oceanology]*, 1986, vol. 26, no. 4, pp. 628—630. (In Russian).
37. Солбаков В. В., Зацепя С. Н., Ивченко А. А. Оценка зоны интенсивного испарения подводного разлива газоконденсата от мелководных скважин // *Арктика: экология и экономика*. — 2024. — Т. 14, № 1. — С. 12—23. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-12-23.
Solbakov V. V., Zatsyepa S. N., Ivchenko A. A. Assessment of the zone of intense gas condensate evaporation during blowouts in shallow wells. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 1, pp. 12—23. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-12-23. (In Russian).
38. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Журавель В. И., Солбаков В. В. Исследование чувствительности псевдокомпонентной модели испарения нефти на поверхности моря к вариации параметров // *Процессы в геосредах*. — 2020. — Вып. 2. — С. 662—674.
Zatsyepa S. N., Ivchenko A. A., Zhuravel V. I., Solbakov V. V. Study of pseudo-component model of oil evaporation On the sea surface sensitivity to variations of parameters. *Processy v geosredakh [Processes in geo-environments]*, 2020, iss. 2, pp. 662—674. (In Russian).
39. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Журавель В. И., Солбаков В. В. Исследование особенностей поведения тонких пленок нефтепродуктов на поверхности моря методом математического моделирования // *Вести газовой науки*. — 2023. — № 3 (55). — С. 101—117.
Zatsyepa S. N., Ivchenko A. A., Zhuravel V. I., Solbakov V. V. Investigation of the behavior of thin films of petroleum products on the sea surface by mathematical modeling. *Vesti gazovoi nauki [News of gas science]*, 2023, no. 3 (55), pp. 101—117. (In Russian).
40. Зацепя С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В., Становой В. В. Прогнозирование распространения нефти и нефтепродуктов в случае аварийного разлива на морских акваториях (научно-методическое пособие). — М.: АО «Финпол», 2018. — 140 с.
Zatsyepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V., Stanovoy V. V. Forecasting the spread of oil and petroleum products in the event of an emergency spill in marine areas (scientific and methodological manual). Moscow, JSC Finpol, 2018, 140 p. (In Russian).

Информация об авторах

Солбаков Вячеслав Викторович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН (119333, Россия, Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2), e-mail: solbakov@ccas.ru.

Затсепа Сергей Николаевич, доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: zatsepa@gmail.com.

Ивченко Александр Александрович, старший научный сотрудник, Государственный океанографический институт им. Н. Н. Зубова (119034, Россия, Москва, Кропоткинский пер., д. 6), e-mail: alivch654@gmail.com.

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING THE EVAPORATION OF GAS CONDENSATE DURING UNDERWATER BLOWOUT

Solbakov, V. V.¹, Zatsepa, S. N.², Ivchenko, A. A.²

¹ Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russian Federation)

² N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute, Roshydromet (Moscow, Russian Federation)

For citing

Solbakov V. V., Zatsepa S. N., Ivchenko A. A. Methodological aspects of the analysis of factors affecting the evaporation of gas condensate during underwater blowout. *Arctic: Ecology and Economy*, 2024, vol. 14, no. 3, pp. 360—369. DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-360-369. (In Russian).

The article was received on April 3, 2024

Abstract

The process of evaporation of gas condensate during emergency blowout of an underwater well has been studied insufficiently. The influence of various factors on the size of the zone of intense evaporation of gas condensate during the blowout of a shallow gas condensate well requires detailed consideration. In this paper, the researchers, using mathematical modeling, have analyzed this effect for wells with parameters characteristic of the Russian Arctic region. They have performed the calculations using the SPILLMOD model and the Lagrangian element evolution model. A significant dependence of the gas outlet area size and the gas blowout size on the sea surface on the values of the gas plume involvement parameter in the model has been revealed, and at the same time a weak dependence of the size of the zone of intense evaporation of gas condensate on this parameter. The values of the mass flow rate of gas condensate in the discharge, as well as its fractional composition, have a noticeably greater effect.

Keywords: emergency blowout of gas condensate wells, evaporation of gas condensate, Arctic, mathematical modeling, Lagrangian elements, computational fluid dynamics, SPILLMOD, oil spill response plans, transport of pollutants in the marine environment.

Information about the authors

Solbakov, Vyacheslav Viktorovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the RAS (44/2, Vavilova St., Moscow, Russia, 119333), e-mail: solbakov@ccas.ru.

Zatsepa, Sergei Nikolaevich, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory for Modeling the state of the Marine Environment, N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkiisky Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: zatsepa@gmail.com.

Ivchenko, Aleksandr Aleksandrovich, Senior Researcher, N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute, Roshydromet (6, Kropotkiisky Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: alivch654@gmail.com.