

УДК: 532.54, 504.5

## Математическая модель для оценки зоны интенсивного испарения газового конденсата при выбросах на мелководных скважинах

В. В. Солбаков<sup>1,а</sup>, С. Н. Зацеп<sup>2</sup>, А. А. Ивченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» Российской академии наук,  
Россия, 119333, г. Москва, ул. Вавилова, д. 44, корп. 2

<sup>2</sup>Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет,  
Россия, 119034, г. Москва, Кропоткинский пер., д. 6

E-mail: <sup>а</sup> solbakov@ccas.ru

*Получено 27.11.2024, после доработки — 26.03.2025.*

*Принято к публикации 02.04.2025.*

Безопасное проведение аварийно-восстановительных работ на аварийных морских газоконденсатных скважинах возможно при учете опасных факторов, препятствующих проведению противофонтанных мероприятий. Одним из таких факторов является загазованность района работ вследствие выхода из водной толщи большого количества легкого, по сравнению с воздухом, природного газа, а также паров более тяжелых компонентов газового конденсата (ГК). Для оценки распределения взрывоопасных концентраций паров нефтепродукта в приводном слое атмосферы необходимо определить характеристики источника загазованности. На основании анализа теоретических работ, посвященных формированию поля скорости в верхнем слое моря вследствие выхода на поверхность большого количества газа, предложена аналитическая модель для расчета размеров области, в которой происходит испарение значительного количества поступающего на поверхность ГК при авариях на мелководных скважинах. Рассматривается стационарный режим истечения пластового продукта при открытом фонтанировании газонефтяных скважин морского базирования при подводном расположении их устья. Построена малопараметрическая модель испарения нефтепродуктов из пленок различной толщины. Показано, что размер зоны интенсивного испарения ГК при подводном выбросе на мелководных скважинах определяется объемным потоком жидкой фракции ГК, его фракционным составом и выбранным порогом для оценки потока паров нефтепродукта в атмосферу. В контексте данной работы мелководными называются скважины при дебите газа от 1 до 20 млн м<sup>3</sup> на глубинах порядка 50–200 метров. В этом случае струя пластового флюида из устья скважины на морском дне трансформируется в пузырьковый шлейф, типичная для летне-осеннего периода стратификация водной толщи не ограничивает выход шлейфа на поверхность моря, а скорость подъема пузырьков позволяет не принимать во внимание процесс растворения газа. Проведенный анализ был ограничен условиями близкими к штилевым. Такие условия благоприятны для проведения морских операций, однако неблагоприятны с точки зрения рассеяния высоких концентраций паров нефтепродуктов в приводном слое атмосферы над морем. В результате проведенной работы предложено аналитическое соотношение для приближенной оценки зоны интенсивного испарения ГК.

Ключевые слова: аварийное фонтанирование газоконденсатных скважин, испарение газового конденсата, Арктика, математическое моделирование, зоны интенсивного испарения газового конденсата, планы ликвидации разливов нефти

UDC: 532.54, 504.5

## A mathematical model for estimating the zone of intense evaporation of gas condensate during emissions from shallow wells

V. V. Solbakov<sup>1,a</sup>, S. N. Zatsepa<sup>2</sup>, A. A. Ivchenko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences,  
44/2 Vavilova st., Moscow, 119333, Russia

<sup>2</sup>N. N. Zubov’s State Oceanographic Institute, Roshydromet,  
6 Kropotkinskiy lane, Moscow, 119034, Russia

E-mail: <sup>a</sup> solbakov@ccas.ru

*Received 27.11.2024, after completion – 26.03.2025.*

*Accepted for publication 02.04.2025.*

Safe carrying out of emergency recovery operations at emergency offshore gas condensate wells is possible when taking into account the hazardous factors that prevent anti-fontanning measures. One of such factors is the gassiness of the operation zone due to the release from the water column of a large amount of light, as compared to air, natural gas, as well as vapours of heavier components of gas condensate. To estimate the distribution of explosive concentration of petroleum product vapours in the near surface layer of the atmosphere, it is necessary to determine the characteristics of the source of the contamination. Based on the analysis of theoretical works concerning to the formation of the velocity field in the upper layer of the sea as a result of large amounts of gas coming to the surface, an analytical model is proposed to calculate the size of the area in which a significant amount of gas condensate coming to the surface is vaporised during accidents at shallow-water wells. The stationary regime of reservoir fluid flow during fountaining of offshore gas and oil wells with an underwater location of their mouths is considered. A low-parametric model of oil product evaporation from films of different thickness is constructed. It is shown that the size of the zone of intensive evaporation at shallow-water wells is determined by the volume flow of liquid fraction, its fractional composition and selected threshold for estimation of oil product vapour flow into the atmosphere. In the context of this work shallow water wells are wells with gas flow rate from 1 to 20 million cubic meters at sea depths of about 50–200 metres. In this case, the formation fluid jet from the wellhead on the seabed is transformed into a bubble plume, the stratification of the water column, typical for the summer-autumn period, does not limit the plume’s exit to the sea surface, and the velocity of bubble rise allows the gas dissolution process to be disregarded. The analysis was limited to almost calm hydrometeorological conditions. Such conditions are favourable for offshore operations, but unfavourable from the point of view of dispersion of high concentrations of oil product vapours in the near surface layer of the atmosphere. As a result of this work, an analytical dependence for an approximate assessment of the zone of intensive evaporation of gas condensate is proposed.

**Keywords:** emergency blowout of gas condensate wells, evaporation of gas condensate, the Arctic, mathematical modeling, zones of intense evaporation of gas condensate, oil spill response plans

**Citation:** *Computer Research and Modeling*, 2025, vol. 17, no. 2, pp. 243–259 (Russian).

## Введение

Подводные выбросы нефти и природного газа в результате аварий при морском бурении, подводных установках или повреждении газопроводов представляют потенциальную опасность для судов, морских сооружений и могут иметь серьезные последствия для окружающей среды. В этой связи анализ факторов, влияющих на возможность проведения аварийно-восстановительных работ, представляется необходимым. Оценка размеров зоны, в которой возможно безопасное проведение противофонтанных мероприятий при строительстве и эксплуатации газоконденсатных скважин в шельфовых районах морей РФ и, прежде всего, в Арктике, является важной задачей. От ее решения зависит выбор оптимального метода проведения аварийно-восстановительных работ. Вполне очевидно, что подобный выбор должен принимать во внимание гидрометеорологические условия в регионе работ. В ряде случаев, например при значительной высоте волны или при тяжелых ледовых условиях, проведение операций может быть невозможно. Однако даже при благоприятных погодных условиях необходимо тщательно оценивать риски, связанные с опасными факторами, возникающими вследствие выхода нефтегазовой струи на поверхность моря. Риски, связанные с подводным выбросом газа, включают 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 проведении аварийно-восстановительных работ. При авариях на подводных нефтегазовых скважинах, сопровождающихся выходом жидких и газообразных углеводородов на морскую поверхность, под действием ветра, течений и гравитационного растекания формируется протяженная, в некоторых случаях многокилометровая, область нефтяного загрязнения. При выходе на поверхность газоконденсата (ГК), в составе которого имеется большое количество низкокипящих углеводородов, в области поверхностного пятна нефтепродукта формируется подобласть с интенсивным испарением. Целью данной работы является оценка размеров этой подобласти, необходимая для определения границы зоны безопасности, обусловленной взрывоопасной концентрацией нефтяных углеводородов в воздухе.

## Состояние вопроса

Физическая картина явлений при выбросе ГК из мелководной скважины представляется следующей. Пластовый продукт (флюид), который состоит из газа, ГК и пластовой воды, выходит из устья скважины или из каверны на морском дне. Газовый конденсат [ГОСТ Р 53521-2009, 2010] — «жидкая смесь, состоящая из парафиновых, нафтеновых и ароматических углеводородов широкого фракционного состава, содержащая примеси неуглеводородных компонентов, получаемая в результате разделения газоконденсатной смеси». Основные начальные характеристики газоконденсатных залежей (насыщенных пластовых систем), в которых флюид содержит растворенные компоненты ГК, приведены в [Лапшин, Волков, Константинов, 2014]. Физические условия в месте выхода пластового продукта на морском дне соответствуют наличию двух отдельных фаз: природный газ и ГК. Первоначальный импульс струи флюида теряется на сравнительно небольшом расстоянии от места истечения с формированием пузырькового шлейфа — потока морской воды, содержащей пузырьки газа и капли ГК. Под действием сил плавучести шлейф поднимается к поверхности. По мере подъема в шлейф вовлекается окружающая морская вода, изменяется внешнее давление, увеличивается объем газовой фазы и, соответственно, силы плавучести. Скорость подъема пузырькового шлейфа зависит от характеристик фонтанирования и может достигать значений в несколько метров в секунду вблизи поверхности моря. В месте выхода пузырькового шлейфа на поверхность наблюдается локальное увеличение уровня моря

(фонтан) и формируется система течений, направленных от центра фонтана к периферии. Газовая фаза оказывается на поверхности и переносится в атмосфере, ГК увлекается поверхностными течениями и по мере движения на поверхности моря испаряется, а пары его также рассеиваются в атмосфере. На рис. 1 (адаптировано по материалам работы [Fanneløp, Sjøen, 1980]) приведена схема течений, формирующихся при фонтанировании мелководной газовой скважины.

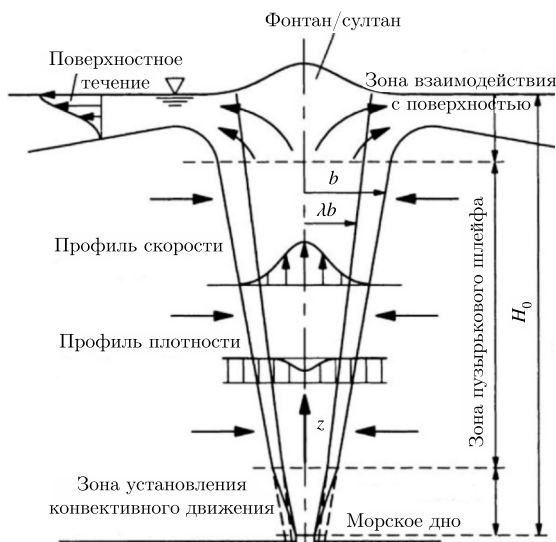


Рис. 1. Схема мелководного нефтегазового выброса (адаптировано по материалам работы [Fanneløp, Sjøen, 1980]):  $H_0$  — глубина моря,  $b$  — внешний радиус струи,  $\lambda$  — отношение радиуса пузырькового ядра к внешнему радиусу струи

Для оценки размеров области выхода пузырькового шлейфа на морскую поверхность, как правило, используются интегральные модели и условно трехмерные гидродинамические модели с параметризацией межфазного взаимодействия [Fanneløp, Bettelini, 2007]. Несмотря на определенный прогресс в области вычислительной гидродинамики, интегральные модели остаются преобладающим инструментом для описания пузырьковых шлейфов [Olsen, Skjetne, 2016].

Для подробного описания эволюции газа и паров углеводородов в атмосфере требуется использовать набор моделей: модель переноса газа в атмосфере [Берлянд, 1975], модель «ближней зоны», описывающую процесс истечения пластового продукта из устья скважины, в том числе дисперсные характеристики капель и пузырьков по завершении струйного истечения флюида, модель плавучего шлейфа в водной толще [Архипов, Котеров, Солбаков, 2000; Котеров и др., 2007; Boufadel et al., 2020], модель распространения нефтяного разлива на поверхности моря, которая может описывать эволюцию поверхностного загрязнения в различных приближениях [Зацепа и др., 2018a; Зацепа и др., 2018b; Zatsesa, Ivchenko, Solbakov, 2022], и модель распространения пассивной плавучей или нейтральной примеси в водной толще [Shiau, Juang, 1998; Solbakov, 2004].

В работах [Солбаков, Зацепа, Ивченко, 2024a; Солбаков, Зацепа, Ивченко, 2024b; Solbakov, Zatsesa, Ivchenko, 2025] были приведены результаты вычислительных экспериментов и сделаны оценки размеров области, в которой происходит испарение значительной части газоконденсата (ГК) при авариях на мелководных скважинах. Показано, что к важнейшим факторам, влияющим на размеры области интенсивного испарения, относятся дебит скважины, газовый фактор и характеристики дистилляции жидкого нефтепродукта, поступающего на поверхность моря. Фактор мелководья при подводных выбросах ГК влияет на возможность образования газовой фонтана на поверхности, несмотря на имеющую место в ряде случаев устойчивую стратификацию

морской среды. В зависимости от соотношения между стратификацией водной толщи, глубиной моря и дебитом газа в аварийной скважине пузырьковый шлейф может рассеяться, поднимаясь вверх, либо выйти на поверхность. В большинстве случаев, характерных для условий российского арктического шельфа и субполярных районов, ожидаемые дебиты газа для скважин  $Q_{gnc}$  находятся в диапазоне от 5 до 15 млн м<sup>3</sup>/сут. [Мансуров, 1992], глубина моря — до 200 м. Отметим, что значения объема газа, поступающего на поверхность при фонтанировании, приближенно на три порядка больше значений объема ГК. Оценим возможность выхода пузырькового шлейфа на поверхность моря и, соответственно, возможность формирования газового фонтана. Согласно [Asaeda, Imberger, 1993] высота интрузии — уровень нейтральной плавучести, определяется как  $L = cB^{1/4}N^{-3/4}$ , здесь  $N^2 = -\frac{g}{\rho_w} \frac{\partial \rho_w}{\partial z}$  — частота Вайселя–Брента,  $B = g'Q_{gnc}$  — поток плавучести,  $g' = g \frac{\rho_w - \rho_g}{\rho_w} \approx g$  — редуцированное ускорение силы тяжести,  $g$  — ускорение свободного падения,  $\rho_w, \rho_g$  — плотность воды и газа (метана),  $Q_{gnc}$  — расход газа при нормальных условиях. Типичный диапазон значений коэффициента  $c$  составляет 0,4–4,5, причем более высокие значения соответствуют высоким скоростям факела [Asaeda, Imberger, 1993]. В летне-осенний период для арктических и субполярных областей характерно значение  $N \approx 10^{-2} \text{ с}^{-1}$ . Для подобной стратификации и расходов газа высота интрузии составит не менее 300–400 метров, что превышает рассматриваемые нами глубины водоемов, относимых к мелководным акваториям.

Дебит газа аварийной скважины определяет скорость, с которой пластовый продукт вместе с водой выходит на поверхность моря, образуя фонтан. Разные исследователи [Котеров и др., 2007; Neto, 2012; Fanneløp, Sjøen, 1980; Milgram, 1983] используют различные значения коэффициента вовлечения в струю  $\alpha$  в интегральных моделях пузырькового шлейфа. От этого коэффициента зависит итоговая оценка и радиуса  $b_s$  области выхода газа на поверхность, и скорости  $u_s$ , с которой будет вода двигаться по поверхности моря от области фонтана к периферийным областям. Параметризация радиального поверхностного течения была предложена в работе [Fanneløp, Sjøen, 1980], подтверждена в работе [Milgram, 1983], по крайней мере на расстояниях от центра выхода газа на поверхность порядка 15–20 радиусов фонтана. Следует отметить, что, несмотря на некоторый прогресс в части построения моделей, описывающих течения на поверхности моря вблизи фонтана [Olsen, Skjetne, 2016; Гамера и др., 2024; Cloete, Olsen, Skjetne, 2009], они все еще не обеспечивают надежного и достоверного решения в широком диапазоне имеющихся параметров задачи. Одна из причин связана с отсутствием экспериментов, которые могли бы подтвердить выводы теоретических построений. 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. Построение адекватных CFD-моделей для движения многофазной среды также остается проблемным из-за сложности формулировки взаимодействия между различными фазами.

В работе [Солбаков, Зацепя, Ивченко, 2024а] были проведены численные расчеты эволюции газового конденсата на поверхности моря для набора сценариев выброса. В сценариях варьировались глубина моря, коэффициент вовлечения в струю и газовый фактор (см. табл. 1). Отдельно авторы провели расчеты для наборов искусственного нефтепродукта, дистилляционные характеристики (кривые дистилляции) отличались постоянным сдвигом (выше и ниже) температуры кипения фракций на 20 °С относительно базовой кривой.

Были использованы модели пузырькового шлейфа в водной толще, радиального течения по поверхности моря, испарения смеси нефтепродуктов, заданной концентрациями псевдоконпонент. Дистилляционные кривые для нефтепродуктов конкретных месторождений могут быть получены только в результате специальных испытаний, как правило проводимых компаниями-эксплуатантами нефтегазовых месторождений. В открытом доступе эти сведения крайне ограничены, и для целей исследования использовался фракционный состав сырого ГК согласно ра-



Таблица 1. Сценарии численных расчетов

№	A	B	C	D	A–	B–	A+	B+	E	F
Расход ГК, м <sup>3</sup> /сут	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500	3000	3000
Глубина моря, м	100	100	50	50	100	100	100	100	100	100
Параметр вовлечения в струю, $\alpha$	0,1	0,215	0,1	0,215	0,1	0,215	0,1	0,215	0,1	0,215
Радиус шлейфа у поверхности, м	11,6	25	5,8	12,5	11,6	25	11,6	25	11,6	25
Скорость в шлейфе у поверхности, м/с	5,6	3,4	8,4	5,1	5,6	3,4	5,6	3,4	5,6	3,4

боте [Солбаков, Зацепя, Ивченко, 2024b]. Для примера были использованы сведения о фракционном составе<sup>1</sup> Лунского газоконденсатного месторождения.

В результате численного моделирования были получены оценки размеров зон интенсивного испарения газового конденсата. В работе был сделан вывод, что выбор параметра вовлечения в струю имеет ограниченное влияние на размеры зоны интенсивного испарения ГК. Влияние же содержания ГК в сбросе — газовый фактор (GOR — gas oil ratio), проявляется в большей степени так же, как и влияние фракционного состава ГК. В цитируемой работе отмечено, что аварийное фонтанирование мелководной скважины приводит к действию на поверхности моря двух источников поступления нефтяных углеводородов в атмосферу: первый в месте выхода газа (метан) локализуется в пределах первых десятков метров вблизи фонтана, второй (испарение газоконденсата) распределен в пределах области с радиусом 100–300 м от места выхода фонтана на поверхность моря.

Представляется важным проанализировать результаты расчетов, полученных при численном моделировании распространения по поверхности моря ГК, и построить аналитическую модель формирования зоны интенсивного испарения ГК, учитывающую основные факторы и механизмы трансформации подводного газоконденсатного выброса.

## Постановка задачи

Аналитическая модель должна связать функциональным соотношением размеры зоны интенсивного испарения ГК с основными параметрами выброса — расходом газа, глубиной моря, содержанием жидкой фракции ГК. Модель для оценки параметров зон интенсивного испарения ГК может быть построена на основе результатов теоретических исследований подводных пузырьковых шлейфов, изложенных во многих работах [Fanneløp, Sjøen, 1980; Котеров и др., 2007; Neto, 2012], и малопараметрической модели испарения, учитывающей особенности фракционного состава нефтепродуктов.

Рассматриваем ситуацию, когда и движение воды, и вынос пластового продукта на поверхность приобрели стационарный характер. Дебит газа и поток жидкой фракции конденсата  $Q_c$  сохраняются неизменными, и на поверхность постоянно выносятся новые «порции» ГК.

Радиальное течение уносит жидкую фракцию газоконденсатного выброса на периферию области. За границу зоны газовой фонтана, условно ограниченной радиусом  $2b_s$ , где  $b_s$  — расчетный радиус пузырькового шлейфа на поверхности, в единицу времени поступает количество конденсата  $M_1 = \frac{\rho_g Q_{gnc}}{GOR_m}$ , где  $Q_{gnc}$  — поток газа в нормальных условиях (в м<sup>3</sup>/с),  $\rho_g$  — плотность газа,  $GOR_m$  — массовый газовый фактор, или отношение массы газа в выбросе к массе

<sup>1</sup> Standard Assay Lunscoe condensate: Report Nr. 12002/0000909, April 28, 2009. Handled by R. A. van Rijswijk.

жидкой фракции нефтепродукта при нормальных условиях. Будем считать, что эта масса конденсата равномерно распределяется в пределах «условно первого» кольца, внутренний радиус которого  $r_1$  равен  $2b_s$ , внешний —  $2b_s + u(r_1)\Delta t$ , где  $u(r)$  — скорость течения на поверхности моря, так что площадь кольца составляет  $S_1 = 4\pi u(r_1)\Delta t \left( b_s + \frac{\Delta t \cdot u(r_1)}{2} \right)$ . Под действием радиального течения указанная масса газоконденсата в следующий момент времени окажется в кольцевом элементе, примыкающем снаружи к рассмотренному ранее, так что внутренний радиус этого «условно второго» элемента будет соответствовать внешнему радиусу «условно первого» кольцевого элемента, а внешний — расстоянию  $r_1 + (u(r_1) + u(r_2))\Delta t$ . Так как на небольшом удалении от границ газоводяного фонтана предполагается, что потоки воды в горизонтальном направлении слабо меняются в зависимости от расстояния, то можно считать, что площади  $S_i$  кольцевых элементов будут квазипостоянны.

С одной стороны, каждый кольцевой элемент можно рассматривать, как лагранжевый, и при этом масса газоконденсата в нем за счет испарения  $Q_e(t)$  будет уменьшаться со временем, с другой стороны, совокупность кольцевых элементов в эйлеровом представлении можно интерпретировать как изменение в пространстве толщины пленки и потока ГК  $Q_e(r)$  в атмосферу за счет испарения.

### Решение задачи

Согласно [Fanneløp, Sjøen, 1980] скорость горизонтального течения воды на поверхности моря, обусловленная газоводяным фонтаном, задается соотношением

$$u(r) = u_s f(r), \tag{1}$$

где  $u_s$  — вертикальная скорость пузырькового шлейфа вблизи поверхности моря,

$$f(r) = \left[ 2 \left( 1 + \beta \sqrt{2} \left( \frac{r^2}{b_s^2} - 4 \right) \right) \right]^{-1/2}, \quad r > 2b_s, \tag{2}$$

где  $\beta$  — параметр вовлечения в струю на горизонтальном участке фонтана, значение которого принимают равным коэффициенту вовлечения в пузырьковый шлейф на его вертикальном участке [Fanneløp, Sjøen, 1980]. Соотношение (2) получено исходя из предположения о сохранении массы и импульса вертикальной струи в радиальном потоке жидкости с учетом вовлечения в горизонтальный поток нижележащих слоев воды. Дополнительно предполагается, что начальная толщина  $\tilde{h}$  и скорость радиального потока  $\tilde{u}$  на расстоянии  $2b_s$  от центра струи равны  $\tilde{h} = \frac{b_s}{\sqrt{2\pi}}$  и  $\tilde{u} = \frac{b_s}{\sqrt{2}}$  соответственно. На удалении от центра струи радиальная скорость обратно пропорциональна расстоянию от центра выхода шлейфа на поверхность (гиперболическая зависимость).

Движение лагранжева кольцевого элемента, в начальный момент времени  $t = 0$  находящегося на расстоянии  $2b_s$  от центра фонтана, в момент времени  $t$  определится решением обыкновенного дифференциального уравнения:

$$\frac{dr}{dt} = u_s f(r). \tag{3}$$

Решение (3) с начальным условием  $r(0) = 2b_s$  имеет следующий вид:

$$r(t) \approx b_s \sqrt{\frac{1,19}{\sqrt{\beta}} \frac{u_s t}{b_s} + 4}. \tag{4}$$

Примерное равенство в формуле (4) связано с пренебрежением отклонения зависимости (2) от гиперболического закона изменения скорости радиального потока при малых значениях радиуса.

Квазипостоянная площадь кольцевого элемента, формирующегося в единицу времени для модели течения (2), равна

$$\bar{S} \approx 3,76 \frac{b_s u_s}{\sqrt{\beta}}. \quad (5)$$

Представим область испарения газоконденсата как последовательную совокупность  $n$  кольцевых элементов постоянной площади с центральными радиусами  $r_1 < r_2 < \dots < r_i < r_n$ , где внутренний радиус следующего кольцевого элемента совпадает с внешним радиусом предыдущего. Поскольку, как было указано выше, кольцевой элемент с номером  $i$  формируется из кольцевого элемента  $(i - 1)$  за время  $\Delta t$  между моментами времени  $t_i$  и  $t_{i-1}$ , то можно считать, что изменение со временем потока на испарение ограниченной массы газоконденсата в кольцевом элементе совпадает с изменением по пространству стационарного потока на испарение в зависимости от центра области выхода газоконденсата к поверхности моря.

Оценим расход паров ГК в кольцевой области от  $2b_s$  до  $r(t)$ , учитывая наличие однозначной зависимости  $r$  и  $t$ , задаваемой соотношением (4).

Представим процесс, в котором на поверхности моря за время  $\Delta t$  появляется первый кольцевой элемент с внутренним радиусом  $r = 2b_s$ , со временем он трансформируется, изменяя за промежуток времени  $\Delta t$  «свой» радиус на величину  $\Delta r = u(r)\Delta t$ . Таким образом, за время  $t = n\Delta t$ , соответствующее  $n$  шагам по времени, из рассматриваемого кольцевого элемента испарится масса ГК  $Q(n\Delta t)\Delta t = Q(t)\Delta t$ . Соответственно, из  $n$  кольцевых элементов, которые к моменту времени  $t$  разное время экспонировались на поверхности, расход паров ГК составит

$$Q_{\Sigma}(t) = \sum_{i=1}^n Q_i(i\Delta t) = Q_c \int_0^t M_{Ev}(t') dt', \quad (6)$$

где  $M_{Ev}(t)$  — доля ГК, испарившегося из кольцевого элемента, а  $Q_{\Sigma}(t)$  — расход паров ГК (кг/с) в области, ограниченной радиусом  $r(t)$ ,  $Q_c$  — расход ГК (кг/с), попадающего на поверхность из источника.

С учетом (5) начальная толщина пленки в кольцевом элементе —

$$h_0 = \frac{Q_c}{\rho_c \bar{S}} \approx 0,266 \frac{Q_c}{\rho_c u_s b_s} \sqrt{\beta}, \quad (7)$$

где  $\rho_c$  — плотность газового конденсата.

## Малопараметрическая модель испарения нефтепродуктов

Нефть и нефтепродукты — это смесь углеводородов, которые имеют различные физические и физико-химические характеристики. Процесс испарения в атмосферу жидкой смеси происходит несколько иначе в сравнении с однокомпонентной жидкостью. Поток паров изменяется во времени благодаря изменению фракционного состава жидкости. Статья [Зацепа и др., 2020] посвящена исследованию процесса испарения нефти с использованием псевдокомпонентной модели численными методами.

Для построения аналитической модели оценки зоны интенсивного испарения ГК при подводном выбросе необходимо использовать малопараметрическую модель испарения нефтепродукта. К таким моделям относится соотношение, предложенное Фингасом [Fingas, 2015]:

$$M_{Ev}(t_m) = 0,01(16,5D_v + 0,045(T_a - 15)) \ln t_m, \quad (8)$$



где  $M_{Ev}$  — массовая доля испарившихся из разлива нефтяных углеводородов,  $D_v$  — массовая доля нефтепродукта, отгоняемого при  $180^\circ\text{C}$ ,  $T_a$  — температура окружающей среды ( $^\circ\text{C}$ ),  $t_m$  — время (в минутах). Единственным параметром в соотношении (8), определяемым фракционным составом нефтепродукта, является  $D_v$ .

Соотношение (8) может рассматриваться как статистически обработанный набор экспериментальных данных по испарению нефтепродуктов, отличающихся содержанием  $D_v$  компонент с температурами кипения ниже  $180^\circ\text{C}$ . Однако все эксперименты были проведены для исследования испарения фиксированного количества (20 мл) различных нефтепродуктов из чашки Петри, что эквивалентно испарению из слоя толщиной 1,89 мм. По этой причине соотношение (8) может быть использовано для верификации других моделей испарения нефтепродуктов, в частности псевдокомпонентной модели (ПКМ) [Зацева и др., 2020; Солбаков, Зацева, Ивченко, 2024b]. Коэффициент достоверности аппроксимации результатов расчета испарения по Фингасу расчетной зависимостью псевдокомпонентной модели для толщины пленки ГК в 1,89 мм равен 0,94. Однако зависимость количества испарившегося вещества, выраженная в процентах от исходного значения, демонстрирует значительные расхождения при расчетах испарения для других значений толщины слоя нефтепродуктов. На рис. 2, а представлены расчеты массы испарившегося газоконденсата в процентах ( $M_{Ev}$ ), рассчитанной для различных слоев вещества от 0,2 до 1,8 мм по псевдокомпонентной модели, а также по формуле (8). Применение метода статистического оценивания к результатам, показанным на рис. 2, а, показывает, что при изменении толщины слоя испаряющегося нефтепродукта от 1,8 мм до 0,2 мм коэффициент достоверности аппроксимации результатов расчетов испарения по псевдокомпонентной модели по формуле Фингаса (8) уменьшается от 0,8 для толщины слоя 1,8 мм до 0,06 при толщине слоя 0,2 мм. Для исправления этого недостатка авторами было предложено ввести масштабирование времени экспозиции. В этом случае модифицированная формула Фингаса выглядит как

$$M_{Ev} = 0,01(16,5D_v + 0,045(T_a - 15)) \ln \left( \frac{h_f}{h_0 \cdot t_m} \right), \quad (8a)$$

где  $h_0$  — начальная толщина пленки испаряющейся многокомпонентной жидкости,  $h_f$  — толщина пленки нефтепродуктов в экспериментах Фингаса [Fingas, 2015].

На рис. 2, б показано сравнение расчетов испарения по псевдокомпонентной модели [Зацева и др., 2020] и формуле (8a). Пренебрегая поправкой на температуру окружающей среды, что соответствует погрешности не более 5% при расчете потерь массы ГК, упростим (8a) до следующего соотношения:

$$M_{Ev} = 0,165D_v \ln \left( \frac{h_f \cdot t}{h_0 \cdot 60} \right). \quad (8b)$$

Коэффициент достоверности аппроксимации результатов расчетов по псевдокомпонентной модели модифицированной формулой Фингаса при использовании параметра  $D_v = 0,84$ , определенного по данным дистилляции, показывает значения от 0,88 до 0,6. Подбор параметра  $D_v$  в модифицированной формуле Фингаса позволяет повысить коэффициент достоверности аппроксимации результатов расчетов испарения по псевдокомпонентной модели до значений 0,95 и выше в диапазоне толщин испаряющихся слоев ГК от 1,8 мм до 0,2 мм.

На рис. 3 приведены расчеты испарения с фиксированной площади для различных толщин пленки ГК, в том числе для толщин, определенных соотношением (7), в сценариях выбросов А–Д. Представленные результаты показывают, что расчеты с параметром  $D_v = 0,94$  лучше описывают испарение ГК на временном интервале 5–10 минут, чем с  $D_v = 0,99$ .

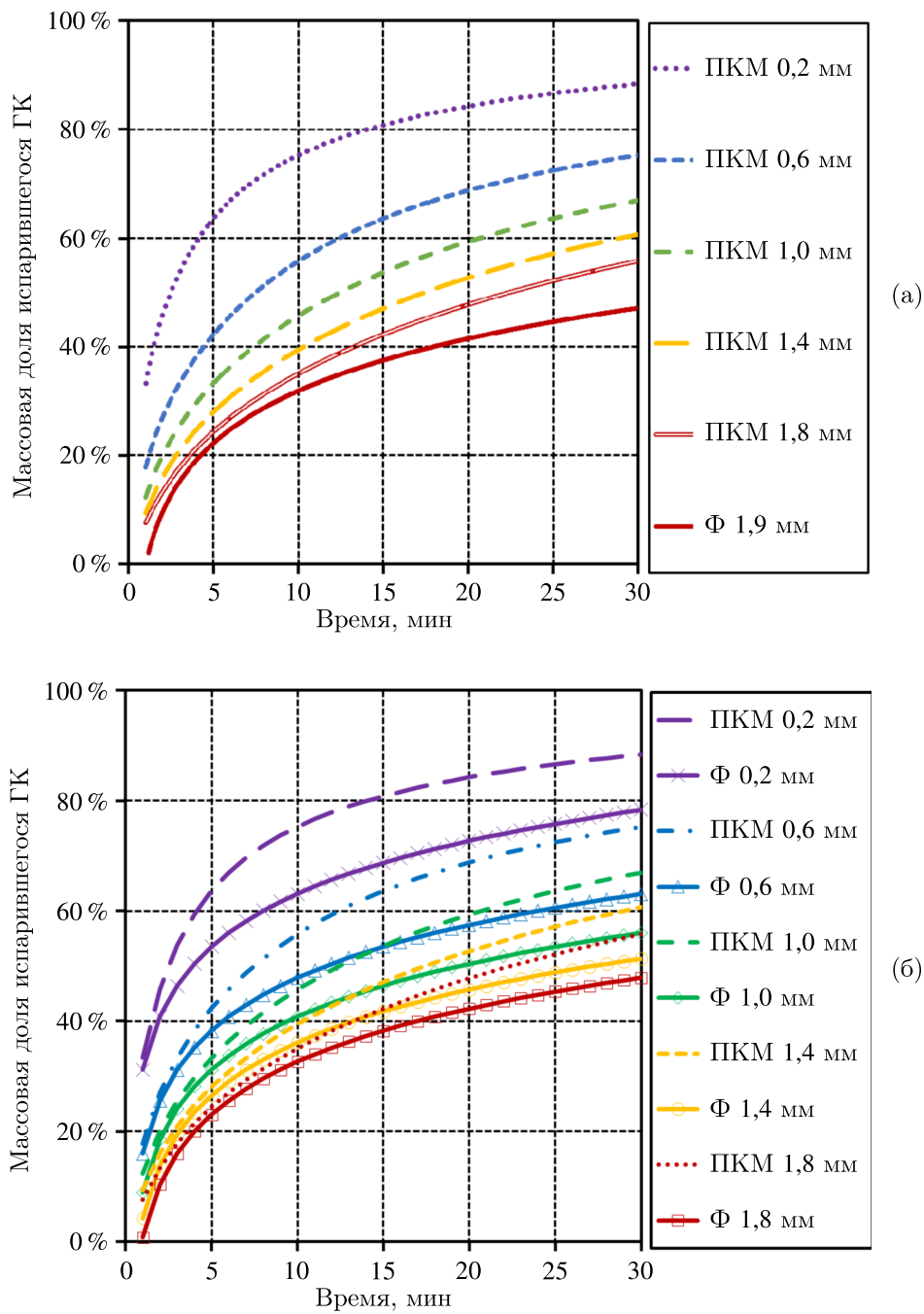


Рис. 2. Расчеты испарения ГК по исходной (а) и модифицированной (б) формулам Фингаса

Если использовать для оценки испарения ГК модифицированную формулу Фингаса, то соотношение (б) можно переписать в виде

$$Q_{\Sigma}(t) = 0,165D_v Q_c \ln \left( \frac{h_f t}{h_0} \right) = \widehat{M}_{Ev}(t) \cdot Q_c, \quad (9)$$

где  $\widehat{M}_{Ev}$  — доля расхода паров ГК от расхода ГК в источнике,  $h_f = 1,89 \cdot 10^{-3}$  м.

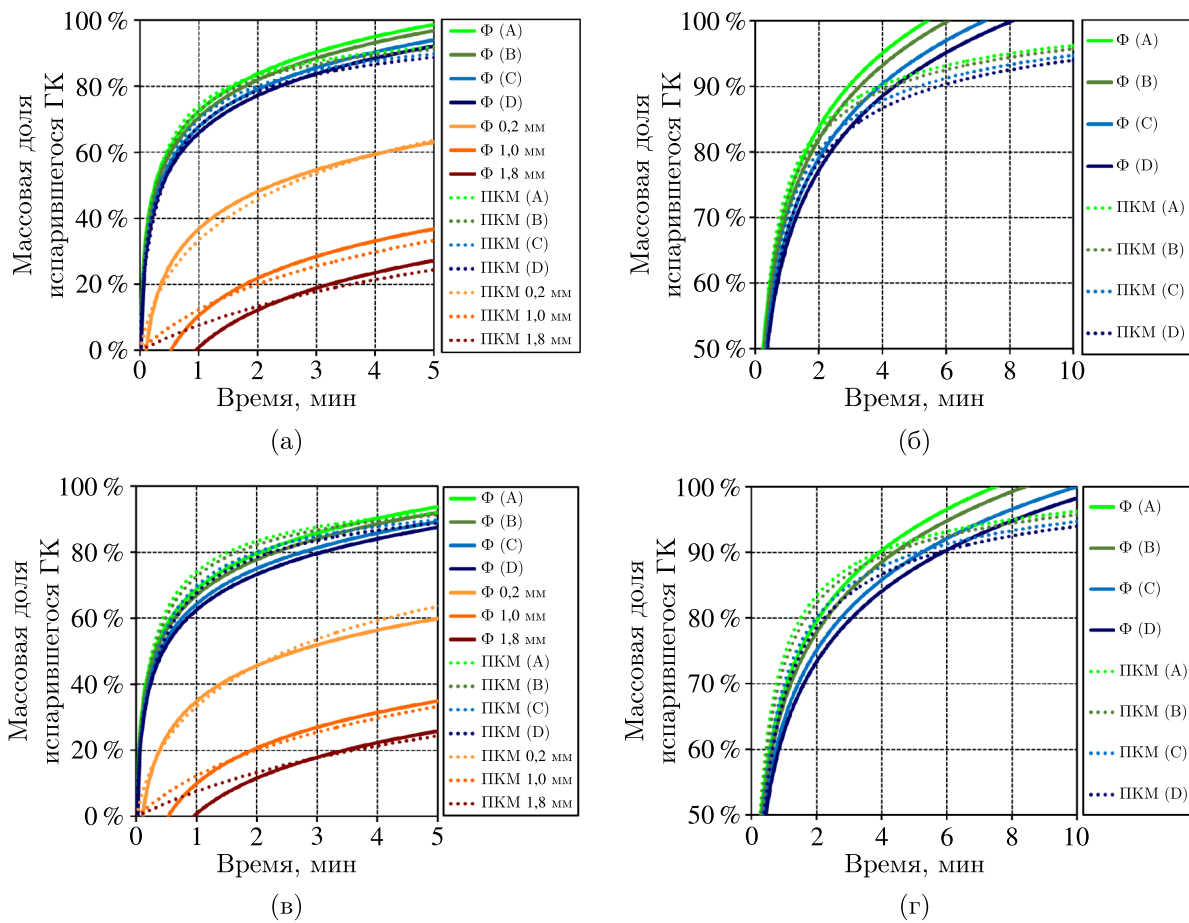


Рис. 3. Расчеты испарения для пленок различной толщины по псевдокомпонентной модели и модифицированной формуле Фингаса: (а) и (б) — для значения параметра  $D_v = 0,99$ ; (в) и (г) — для  $D_v = 0,94$ ; (б) и (г) — детализация для выбранных вариантов расчетов

Используем (7) и из последнего равенства соотношения (9) выразим время:

$$t \approx 8,44 \cdot 10^3 \frac{Q_c}{\rho_c u_s b_s} \frac{\sqrt{\beta}}{D_v} \exp\left(\frac{6,06 \widehat{M}_{Ev}}{D_v}\right). \tag{10}$$

Подставим (10) в (4), чтобы определить радиус области пролива ГК на поверхности моря, поток на испарение из которого в атмосферу соответствует  $\widehat{M}_{Ev}$ .

$$r \approx \sqrt{10^4 \frac{Q_c}{\rho_c} \exp\left(\frac{6,06 \widehat{M}_{Ev}}{D_v}\right) + 4b_s^2}. \tag{11}$$

Обратим внимание, что в интересующем нас случае аварии на скважине массовый расход газоконденсата оценивается в 13 кг/с, плотность ГК — примерно 750 кг/м<sup>3</sup>, первый член в подкоренном выражении существенно больше второго, и, таким образом, зависимость радиуса пятна интенсивного испарения ГК от параметров фонтана — радиуса  $b_s$  и скорости выхода на поверхность  $u_s$  — оказывается слабой.

## Обсуждение результатов

Оценка размеров области испарения газоконденсата (условный радиус области —  $R_M$ ), составляющего процент  $\widehat{M}_{Ev}$  от общего потока жидкого нефтепродукта на поверхность моря, может быть выражена следующим функциональным соотношением:

$$R_M \approx F(\widehat{M}_{Ev}, Q_c, \rho_c, D_v), \quad (12)$$

где конкретный вид функции определяется структурой формирующегося в районе выхода ГК на поверхность моря течения и свойствами конкретного нефтепродукта.

С учетом (4), (10), (11) для рассмотренной выше оценки испарения ГК с помощью модифицированной формулы Фингаса определим конкретный вид (12):

$$R_M \approx \sqrt{10^4 V_c \exp\left(\frac{6,06 \widehat{M}_{Ev}}{D_v}\right) + 4(1,16 \beta H_0)^2}, \quad (13)$$

где  $V_c = \frac{Q_c}{\rho_c}$  — объемный расход газового конденсата в сбросе,  $H_0$  — глубина моря. Для оценки  $b_s$  в соотношении (13) использовалась формула усредняющей прямой для экспериментальных данных [Котеров и др., 2007].

В таблицах 2 и 3 приведены оценки времени формирования зон интенсивного испарения ГК и соответствующих радиусов, полученных аналитическим путем по соотношениям (10) и (11) и в результате численного моделирования [Солбаков, Зацева, Ивченко, 2024a].

Таблица 2. Сравнение времени формирования параметров зон интенсивного испарения (с) по численной и аналитической моделям

Сценарии	$\bar{S}$ , м <sup>2</sup>	$h_0$ , мм	$\widehat{M}_{Ev}$ , %									
			50		60		70		80		90	
			Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты
A	772	0,022	18	18	34	31	65	56	124	132	237	556
B	689	0,025	20	20	38	34	73	62	139	145	265	612
C	579	0,03	24	24	46	40	87	74	166	173	315	727
D	517	0,034	27	27	51	45	97	83	185	195	353	818

Таблица 3. Сравнение радиусов зон интенсивного испарения (м) по численной и аналитической моделям

Сценарии	$\widehat{M}_{Ev}$ , %									
	50		60		70		80		90	
	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты	Аналитика	Расчеты
A	70	70	94	88	128	118	176	180	242	369
B	83	84	104	101	136	128	181	186	245	369
C	67	67	92	86	127	117	175	179	241	366
D	71	72	95	90	129	120	176	181	242	366

Результаты сравнения времени формирования зон интенсивного испарения, в которых испаряется от 50 % до 90 % потока жидкой фракции ГК, выходящего на поверхность моря, показаны на рис. 4, где численная оценка представлена как  $T_n$ , а аналитическая — как  $T_a$ . Аналогично для численной оценки радиуса зон используется обозначение  $R_n$ , а для аналитической —  $R_a$ .

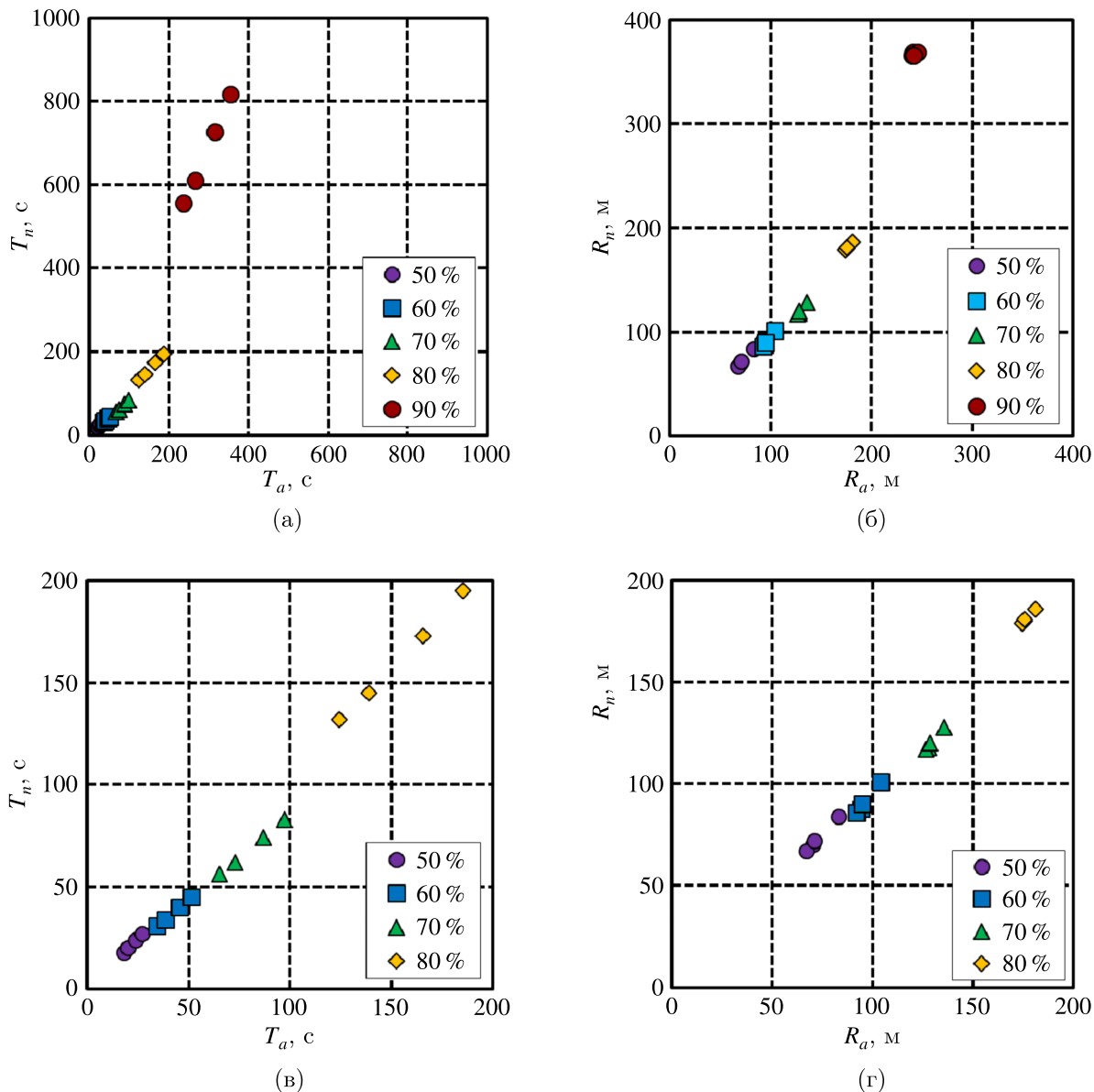


Рис. 4. Сравнение результатов расчетов зон интенсивного испарения ГК по аналитической и численной моделям:  $T_n$  — численная оценка времени,  $T_a$  — оценка времени, полученная аналитически,  $R_n$  — численная оценка радиуса,  $R_a$  — оценка радиуса по аналитической модели. Значения в процентах, приведенные в легенде, соответствуют доле потока испаряющегося ГК относительно расхода ГК в источнике

Приведенные выше результаты сравнения численного моделирования и аналитической модели показывают хорошее совпадение оценок параметров зон интенсивного испарения ГК, где поток в атмосферу составляет от 50 % до 80 % от количества ГК, выходящего на поверхность моря. По аналитической модели оценки времени формирования зоны, где испарение составит до 90 % общего потока, существенно ниже, чем по результатам численного моделирования, что объясняет рис. 3, з, из которого следует, что простая модифицированная формула Финга-



са несколько завышает количество испарившегося нефтепродукта по сравнению с псевдокомпонентной моделью, использованной при численном моделировании.

Полученные результаты, вообще говоря, интуитивно ожидаемы в силу действия разнонаправленных факторов. Меньшие скорости радиального течения в области выхода ГК на поверхность моря приводят к большим «стартовым» толщинам в кольцевых элементах (соотношение (7)), что обуславливает и большее время испарения (соотношение (10)). Меньшие скорости одновременно определяют и медленный рост радиуса пятна пролива (соотношение (4)), что в совокупности приводит к относительно простой зависимости размеров области интенсивного испарения ГК от свойств испаряющегося нефтепродукта.

Аналитическая модель, построенная выше, объясняет результаты численного моделирования испарения ГК на поверхности моря с учетом картины течений на поверхности, определенной соотношением (2), справедливым для нейтральной или слабоустойчивой стратификации водной толщи в районе мелководной аварийной скважины с параметрами дебита газа, приведенными выше.

Отметим, что полученное соотношение (13), по-видимому, не противоречит результатам расчетов по новой модели распространения газожидкостной струи в толще воды при аварии на морской скважине [Гамера и др., 2024], в которой авторы, с одной стороны, не использовали приближение Буссинеска для свободно конвективного движения, но, с другой стороны, не принимали во внимание отмеченную ранее зависимость коэффициента вовлечения воды в пузырьковый шлейф, зависящего от расхода газа [Котеров и др., 2007; Neto, 2012]. Существенное испарение ГК происходит в области с размерами порядка 5–10 радиусов фонтана / выхода газа на поверхность моря. Эти цифры касаются только выбросов из газоконденсатных скважин. Зона интенсивного испарения других нефтегазовых подводных выбросов может быть существенно иной.

## Заключение

Исследованию физических процессов, сопровождающих эволюцию пузырькового шлейфа в водной среде, а также построению моделей посвящено значительное количество статей. Практические задачи, которые были рассмотрены в этих работах, в основном связаны с аэрацией водоемов, а также с аварийными инцидентами на газовых трубопроводах и скважинах в море. Судьба загрязнения поверхности моря нефтепродуктами, которое также может сопровождать аварии, изучена недостаточно, особенно в случае, когда идет речь о крупномасштабных авариях, которые происходят сравнительно редко, и условия в значительной степени далеки от экспериментальных лабораторных. В случае аварийного фонтанирования газоконденсатной скважины источником взрывоопасности может служить не только газ, выход которого преимущественно локализуется вблизи места выхода пузырькового шлейфа на поверхность, но также и пары газоконденсата, который уносится от центра на периферию. Несмотря на развитие численных методов для расчетов эволюции пузырькового шлейфа в воде, моделирование течений в области фонтанирования не свободно от проблем, связанных в первую очередь с заданием параметров модели, например характеристик турбулентности. В связи с этим, а также в силу меньших требований к вычислительным ресурсам аналитические модели не теряют актуальности. Построенная аналитическая модель оценки параметров зон интенсивного испарения ГК в результате аварии на подводной мелководной скважине объясняет обнаруженную ранее слабую зависимость результатов численного моделирования сценариев выбросов на мелководных скважинах от глубины моря и параметра вовлечения окружающей воды в пузырьковый шлейф, выбор которого всегда был проблемой для исследователей.

Аналитическая модель для оценки параметров зон интенсивного испарения ГК построена на основе результатов теоретических исследований подводных пузырьковых шлейфов, подтвержденных экспериментами для более слабых расходов газа. В аналитической модели было принято, что для мелководных скважин (глубины от 50 до 200 метров) влиянием стратификации морской среды можно пренебречь [Солбаков, Зацепя, Ивченко, 2024а; Solbakov, Zatsera, Ivchenko, 2025]. Также на этом этапе авторы рассмотрели решение задачи об оценке параметров зоны интенсивного испарения без учета морских течений в условиях маловетрия.

Для построения аналитической модели авторы модифицировали широко используемую и относительно простую модель испарения Фингаса, соотношения в которой определены экспериментальным путем, где единственным параметром является количество (в процентах) фракций нефтепродукта с температурами кипения ниже 180 °С.

Введением масштабирования времени в классическом соотношении Фингаса удалось аппроксимировать результаты расчетов по псевдокомпонентной модели аналитической зависимостью.

Построенная аналитическая модель оценки параметров зон интенсивного испарения ГК при подводном выбросе на мелководных скважинах показывает, что размеры зоны определяются потоком жидкой фракции ГК, плотностью испаряющегося нефтепродукта, его фракционным составом и выбранным порогом для оценки потока паров нефтепродукта в атмосферу.

Несмотря на хорошее совпадение времени формирования параметров зон интенсивного испарения и радиусов зон интенсивного испарения, рассчитанных на основе аналитических соотношений и численно в целом, для больших значений доли расхода паров наблюдается некоторое расхождение. Это связано с недостатками формулы Фингаса, в которой за фракционный состав отвечает один параметр. Совершенствование метода может состоять в выборе более точной модели испарения с сохранением возможности использования аналитических соотношений.

## Список литературы (References)

- Архипов Б. В., Котеров В. Н., Солбаков В. В. Модель АКС для прогноза распространения промышленных сбросов с морских буровых платформ. — М.: Вычисл. центр им. А. А. Дородницына РАН, 2000. — 72 с.
- Arhipov B. V., Koterov V. N., Solbakov V. V. Model' AKS dlja prognoza rasprostraneniya promyshlennyh sbrosov s morskikh burovyyh platform [AKS model for predicting the spread of industrial discharges from offshore drilling platforms]. — Moscow: Vychisl. centr im. A. A. Dorodnicyna RAN, 2000. — 72 p. (in Russian).
- Берлянд М. Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975. — 448 с.
- Berlyand M. E. Sovremennyye problemy atmosfernoj diffuzii i zagryazneniya atmosfery [Modern problems of atmospheric diffusion and atmospheric pollution]. — Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975. — 448 p. (in Russian).
- Гамера Ю. В., Петрова Ю. Ю., Дурум А. А., Вольнец И. Г., Докутович А. Б., Лобанов А. В. Моделирование опасных факторов на поверхности моря при фонтанировании подводной скважины // Вести газовой науки. — 2024. — № 2 (58). — С. 109–117.
- Gamera Ju. V., Petrova Ju. Ju., Durum A. A., Volynech I. G., Dokutovich A. B., Lobanov A. V. Modelirovanie opasnykh faktorov na poverhnosti morja pri fontanirovanii podvodnoj skvazhiny [Modeling of hazards on the sea surface during the gushing of an underwater well] // Vesti gazovoj nauki. — 2024. — No. 2 (58). — P. 109–117 (in Russian).
- ГОСТ Р 53521-2009. Переработка природного газа. Термины и определения. Дата введения: 2010-07-01.
- GOST R 53521-2009. Pererabotka prirodnogo gaza. Terminy i opredeleniya [Natural gas processing. Terms and definitions]. — 2010 (in Russian).
- 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.
- Zatsera S. N., Ivchenko A. A., Zhuravel' V. I., Solbakov V. V. Issledovanie chuvstvitel'nosti psevdokomponentnoj modeli isparenija nefti na poverhnosti morja k variacii parametrov [Investigation of the sensitivity of a pseudo-component model of oil evaporation on the sea surface to variations in parameters] // Processy v geosredah. — 2020. — No. 2. — P. 662–674 (in Russian).

- Зацева 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. — 2018а. — Т. 64, № 4. — С. 439–454.  
*Zacepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V., Stanovoj V. V.* Metod modelirovanija posledstvij sverhprodlzhitel'nyh avarij na ob'ektah nefte dobychi v Arkticheskom regione [A method for modeling the consequences of long-term accidents at oil production facilities in the Arctic region] // Problemy Arktiki i Antarktiki. — 2018a. — Vol. 64, No. 4. — P. 439–454 (in Russian).
- Зацева С. Н., Ивченко А. А., Солбаков В. В., Становой В. В.* О некоторых инженерных оценках параметров нефтяного разлива в море // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2018б. — Т. 64, № 2. — С. 208–211.  
*Zacepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V., Stanovoj V. V.* O nekotoryh inzhenernyh ocenках parametrov nefljanogo razliva v more [On some engineering estimates of the parameters of an oil spill at sea] // Problemy Arktiki i Antarktiki. — 2018b. — Vol. 64, No. 2. — P. 208–211 (in Russian).
- Котеров В. Н., Архипов Б. В., Солбаков В. В., Юрезанская Ю. С.* Применение математических методов для анализа и оценки экологически значимых событий при крупномасштабной аварии подводного газопровода. — М.: Вычисл. центр им. А. А. Дородницына РАН, 2007. — 74 с.  
*Kotero V. N., Arhipov B. V., Solbakov V. V., Jurezanskaja Ju. S.* Primenenie matematicheskikh metodov dlja analiza i ocenki ekologicheski znachimyh sobytij pri krupnomasshtabnoj avarii podvodnogo gazoprovoda [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]. — Moscow: Vychisl. centr im. A. A. Dorodnicyna RAN, 2007. — 74 p. (in Russian).
- Лапшин В. И., Волков А. Н., Константинов А. А.* Газоконденсатные характеристики углеводородных флюидов нефтегазоконденсатных залежей (начальное определение и корректировки в процессе разработки) // Вести газовой науки: научно-технический сборник. — 2014. — № 4 (20). — С. 119–126.  
*Lapshin V. I., Volkov A. N., Konstantinov A. A.* Gazokondensatnye harakteristiki uglevodorodnyh fljuidov neftegazokondensatnyh zalezhej (nachal'noe opredelenie i korrekcirovki v processe razrabotki) [Gas condensate characteristics of hydrocarbon fluids of oil and gas condensate deposits (initial determination and adjustments during development)] // Vesti gazovoj nauki: nauchno-tehnicheskij sbornik. — 2014. — No. 4 (20). — P. 119–126 (in Russian).
- Мансуров М. Н.* Управление состоянием морской среды при освоении нефтегазовых ресурсов: автореф. дис. . . . д-ра техн. наук. — Владивосток, 1992. — 34 с.  
*Mansurov M. N.* Upravlenie sostojaniem morskoy sredy pri osvoenii neftegazovyh resursov [Management of the state of the marine environment in the development of oil and gas resources]: Avtoref. dis. . . . d-ra tehn. nauk. — Vladivostok, 1992. — 34 p. (in Russian).
- Солбаков В. В., Зацева С. Н., Ивченко А. А.* Методические аспекты анализа факторов, влияющих на испарение газоконденсата при подводных выбросах // Арктика: экология и экономика. — 2024а. — Т. 14, № 3. — С. 360–369. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-360-369  
*Solbakov V. V., Zacepa S. N., Ivchenko A. A.* Metodicheskie aspekty analiza faktorov, vlijajuschih na isparenije gazokondensata pri podvodnyh vybrosah [Methodological aspects of the analysis of factors affecting the evaporation of gas condensate during underwater emissions] // Arctic: Ecology and Economy. — 2024a. — Vol. 14, No. 3. — P. 360–369. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-3-360-369 (in Russian).
- Солбаков В. В., Зацева С. Н., Ивченко А. А.* Оценка зоны интенсивного испарения газоконденсата при выбросах на мелководных скважинах // Арктика: экология и экономика. — 2024б. — Т. 14, № 1. — С. 12–23. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-12-23  
*Solbakov V. V., Zacepa S. N., Ivchenko A. A.* Ocenka zony intensivnogo isparenija gazokondensata pri vybrosah na melkovodnyh skvazhinah [Assessment of the zone of intense evaporation of gas condensate during emissions from shallow wells] // Arctic: Ecology and Economy. — 2024b. — Vol. 14, No. 1. — P. 12–23. — DOI: 10.25283/2223-4594-2024-1-12-23 (in Russian).
- Aaeda T., Imberger J.* Structure of bubble plumes in linearly stratified environments // J. Fluid Mech. — 1993. — Vol. 249. — P. 35–57. — DOI: 10.1017/S0022112093001065
- 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.
- Cloete S., Olsen J. E., Skjetne P.* CFD modeling of plume and free surface behavior resulting from a sub-sea gas release // Applied Ocean Research. — 2009. — Vol. 31, No. 3. — P. 220–225.
- Fanneløp T. K., Bettelini M.* Very large deep-set bubble plumes from broken gas pipelines. — Petroleumstilsynet, 2007. — 70 p.

- Fanneløp T.K., Sjøen K.* Hydrodynamics of underwater blowouts // Norwegian Maritime Res. — 1980. — Vol. 8, No. 4. — P. 17–33.
- Fingas M.* Handbook of oil spill science and technology. — John Wiley & Sons, 2015. — 693 p. — DOI: 10.1002/9781118989982
- Milgram J. H.* Mean flow in round bubble plumes // J. Fluid Mech. — 1983. — Vol. 133. — P. 345–376.
- Neto I. E. L.* Bubble plume modelling with new functional relationships // Journal of Hydraulic Research. — 2012. — Vol. 50, No. 1. — P. 134–137. — DOI: 10.1080/00221686.2011.651278
- Olsen J. E., Skjetne P.* Current understanding of subsea gas release: A review // The Canadian journal of chemical engineering. — 2016. — Vol. 94, No. 2. — P. 209–219.
- 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. — 1998. — Vol. 2. — P. 327–334.
- Solbakov V.* Application of mathematical modeling for water environment problems. — Jyvaskyla: Univ. of Jyvaskyla, 2004. — 66 p. (+included articles).
- Solbakov V. V., Zatsepa S. N., Ivchenko A. A.* Modelling of gas condensate evaporation during blowouts at shallow wells // Modeling, analysis, control and removal of oil and hydrocarbon spills: earth and environmental sciences library / ed. T. Chaplina. — Cham: Springer Nature Switzerland, 2025. — P. 39–60. — [https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-77711-0_2)
- 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. — P. 72–105.