

## ОЦЕНКА ЗОНЫ ИНТЕНСИВНОГО ИСПАРЕНИЯ ГАЗОКОНДЕНСАТА ПРИ ВЫБРОСАХ НА МЕЛКОВОДНЫХ СКВАЖИНАХ

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

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

<sup>2</sup> Государственный океанографический институт имени Н. Н. Зубова, Росгидромет (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 13 ноября 2023 г.

### Для цитирования

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.

*Рассмотрены современные представления о механизмах и факторах, определяющих формирование пятна пролива газоконденсата от мелководного подводного аварийного выброса. Определены пространственно-временные масштабы формирования зоны интенсивного испарения для характерных дебитов подводных скважин, необходимые для оценки области повышенной загазованности, в которой невозможно проводить аварийно-восстановительные мероприятия. Установлено, что размеры области интенсивного испарения обусловлены радиальным течением в районе выхода газожидкостного шлейфа на поверхность моря, при небольших значениях скорости ветра и течений зависят от дебита скважины, газового фактора и фракционного состава нефтепродукта. Расчеты были проведены с помощью модели SPILLMOD и модели эволюции характерного лагранжева элемента в области пролива.*

**Ключевые слова:** аварийное фонтанирование газоконденсатных скважин, испарение газового конденсата, Арктика, математическое моделирование, лагранжевы элементы, вычислительная гидродинамика, SPILLMOD, планы ликвидации разливов нефти.

### Введение

В Арктической зоне Российской Федерации сосредоточены огромные запасы углеводородного сырья. Их разведка, добыча и транспортировка должны быть обеспечены современными мерами безопасности, как экологической, так и в первую очередь безопасности персонала объектов нефтегазового комплекса.

Противофонтанная безопасность рассматривается как один из ключевых факторов устойчивого развития освоения морских месторождений углеводородов. 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 и безопасности. В этой связи оценка факторов, влияющих на возможность проведения аварийно-восстановительных работ, представляется необходимой. Среди морских нефтегазовых месторождений следует выделить в отдельную категорию газоконденсатные, которых немало в Арктической зоне России и субполярных областях. К наиболее известным относятся Штокмановское газоконденсатное месторождение в Баренцевом море, ряд разведанных месторождений в Карском море, Кириновское и Южно-Кириновское на шельфе Охотского моря.

Гидрометеорологические условия, например, шторма, а также иные обстоятельства могут препятствовать немедленному или эффективному реагированию [1]. В благоприятных гидрометеорологиче-

ских условиях для проведения работ, тем не менее, также существуют факторы риска. Одним из них является интенсивный выход попутного газа из подводной скважины и испарение легколетучих фракций углеводородов из пятна пролива на поверхности моря. Последнее обстоятельство оказывается значительным при организации противодантных мероприятий на газоконденсатных скважинах. При возникновении аварийной ситуации, сопровождающейся 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, 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, где можно проводить аварийно-восстановительные работы.

#### **Факторы и механизмы формирования пятна пролива газоконденсата от подводного источника**

Развитие подводного выброса нефтегазовой смеси может варьироваться в широких пределах в зависимости от характеристик источника выброса — глубины моря, дебита скважины, газового фактора, состава нефтегазовой смеси, и от гидрологических факторов — течений и плотностной стратификации морской воды.

На первом этапе происходит выброс пластового продукта в виде струи, содержащей нефть/газоконденсат, газ и, возможно, сильно минерализованную воду. Плотность пластовых вод изменяется в диапазоне 1010—1210 кг/м<sup>3</sup>. Вследствие вовлечения окружающей воды радиус плавучей струи растет, а вертикальная скорость падает от нескольких метров в секунду до величины порядка 0,2—0,5 м/с.

Выходящий из устья скважины поток пластового продукта, содержащего жидкие и газообразные нефтяные углеводороды, трансформируется в дисперсную систему из капель нефти и пузырьков газа в морской воде. Нефтепродукт в сильно турбулизованном потоке разбивается на капли диаметром от нескольких микрон до нескольких миллиметров. Распределение капель нефти по размерам определяется скоростью истечения пластового продукта из скважины, межфазным натяжением на границе нефть-вода, вязкостью нефти и морской воды, размером выходного отверстия скважины и газовым фактором GOR (Gas-OilRelation).

Подводные выбросы газоконденсата или нефти с высоким значением газового фактора, как правило, характеризуются более высокой по срав-

нению с выбросом нефти скоростью выхода струи от места аварии. Весь поток можно разделить на три качественно различных области (см. рис. 1а), а именно: на начальный участок, участок однородно перемешанной газожидкостной струи, наиболее протяженную область — в англоязычной литературе называемую «bubble plume», в отечественной литературе — «пузырьковый шлейф», и область взаимодействия шлейфа с поверхностью моря.

Для оценки размеров области выхода пузырькового шлейфа на морскую поверхность используются интегральные модели и условно трехмерные гидродинамические модели с параметризацией межфазного взаимодействия [2]. Несмотря на определенный прогресс в области вычислительной гидродинамики, интегральные модели остаются преобладающим инструментом для описания пузырьковых шлейфов [3]. Интегральные модели пузырьковых шлейфов, как правило, пренебрегают растворением газа по мере подъема к поверхности, что приводит к уменьшению плавучести, и не учитывают турбулентность верхнего слоя воды. В эксперименте Deepspill [4] в серии выбросов нефти и газа с глубины 844 м в Северном море было обнаружено, что газ растворялся до глубин 100—200 м ниже поверхности и поэтому не выходил на поверхность. При нефтегазовых выбросах на мелководных скважинах растворением газа можно пренебречь.

На рис. 1 представлена гидродинамическая схематизация подводного нефтегазового выброса на относительно небольших глубинах до 200 м.

Струйная область или зона установления свободное-конвективного движения вблизи морского дна имеет ограниченную протяженность и мала по сравнению с глубиной моря для большинства случаев. В зоне пузырькового шлейфа движение к поверхности под действием сил плавучести сопровождается вовлечением воды, которое приводит к увеличению горизонтальных размеров шлейфа по мере движения к поверхности. В большинстве интегральных моделей предполагается постоянство коэффициента вовлечения воды в область пузырькового шлейфа, что обуславливает зависимость размеров области выхода фонтана на поверхность только от глубины моря. Данное предположение не противоречит результатам проведенных экспериментов, которые, однако, проводились для сравнительно небольших расходов газа. В работе [2] отмечено, что коэффициент вовлечения должен увеличиваться при увеличении расхода газа, и проведено сравнение экспериментальных наблюдений с аппроксимацией [7], а в работе [8] на основании анализа экспериментальных данных предложена новая аппроксимация зависимости коэффициента вовлечения от расхода газа.

Толщина зоны взаимодействия фонтана с морской средой на поверхности сравнительно невелика, но имеет большое значение при рассмотрении эволюции нефтяного загрязнения (см. рис. 1а).

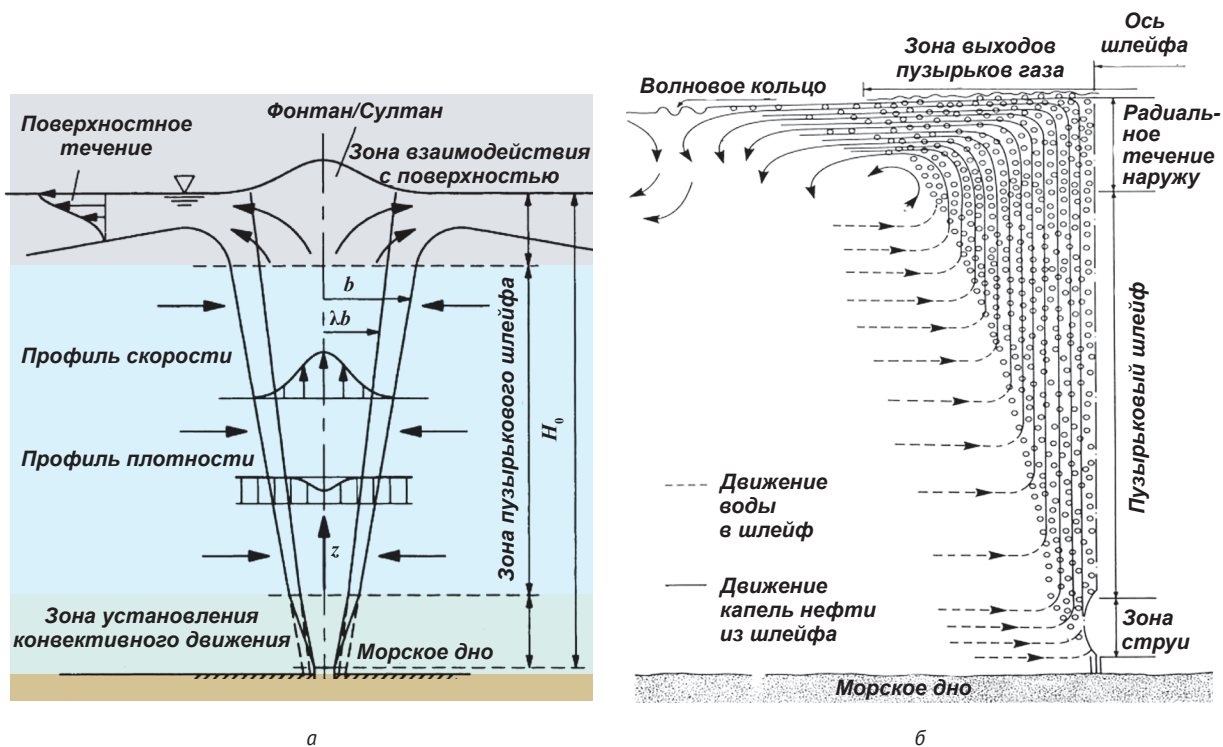


Рис. 1. Схема мелководного нефтегазового выброса: а – составлено авторами по данным [5], б – составлено авторами по данным [6]  
 Fig. 1. Shallow water oil and gas discharge scheme: а – adopted from [5], б – adopted from [6]

Вблизи поверхности образуется область, в которой возникают радиальные течения от места выхода фонтана и которая имеет значительную протяженность (см. рис. 1б). Нефть будет переноситься от центра фонтана на периферию этим быстро движущимся потоком со скоростью намного большей, чем скорость, обусловленная силами гравитационного растекания нефти.

Описанная физическая картина наглядно подтверждается фотоснимками фонтанов двух крупных подводных аварий. Во-первых, это ИХТОС-1 в Мексиканском заливе [9], во-вторых, повреждение подводных газопроводов «Северный поток» [10]. В обоих случаях выброс сопровождался значительным количеством природного газа, в зоне влияния газового фонтана на поверхности моря отчетливо прослеживается область выхода газовой фазы, которая заметно меньше области поверхностного загрязнения в целом. В случае «Северных потоков» на периферии области проявляется пена, а в случае ИХТОС-1 на поверхности моря отчетливо видна область, загрязненная нефтяной эмульсией. При скорости поверхностного течения около одного узла нефтяная пленка распространяется вверх по потоку за счет радиальной скорости, инициируемой газовой фонтаном.

Аварийные выбросы из газоконденсатных скважин имеют специфику, связанную с тем, что легкие низкокипящие фракции углеводородов, испаряясь из пленки на поверхности моря, являются дополни-

тельным источником загазованности в районе аварийно-восстановительных работ.

### Методы

#### Постановка задачи для моделирования

На рис. 2 схематично показана область разлива газоконденсата на поверхности моря при постоянном течении. Внутри этой области выделены: центральная область пролива газоконденсата на поверхности, обозначенная как  $A_r$ , внутри которой происходит выход из водной толщи пузырьков газа (в основном метана). Размеры области  $A_r$  определяются характеристиками пузырькового шлейфа при выходе на поверхность — горизонтальными размерами — радиусом  $b$  газовой фонтана (см. рис. 1а). Размеры этой области сравнительно невелики по отношению к области, занятой пленкой жидких углеводородов, обозначенной на рисунке как  $A_0$ . Формирование области  $A_0$  происходит за счет радиального движения морской воды, вызванного газовой фонтаном, который, как указано выше имеет место при выбросах газа на мелководных скважинах. Скорость радиального течения в этой области весьма велика, хотя и уменьшается примерно обратно пропорционально расстоянию от центра выхода шлейфа на поверхность. Максимальные горизонтальные течения на морской поверхности отмечены на расстоянии в два радиуса фонтана, уменьшаясь до нуля в районе волнового кольца (см. рис. 1б). В соответствии с экспериментами [11] об-

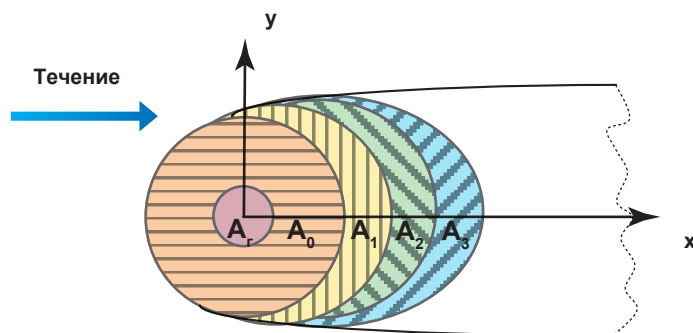


Рис. 2. Схематизация разлива газоконденсата при подводном выбросе от мелководной скважины  
Fig. 2. Schematic diagram of a gas condensate spill during underwater discharge from a shallow well

ласть, за пределы которой влияние фонтана не распространяется, ограничена радиусом  $R_r$ , определяемым эмпирически установленным соотношением

$$R_r = 0,39H_o \left( \frac{10,36V_f}{H_o + 10,33} \right)^{1/3}, \quad (1)$$

где  $H_o$  — глубина выброса;  $V_f$  — объемный расход газа в м<sup>3</sup>/мин.

В области  $A_0$  постоянно присутствует «свежая» жидкая фракция углеводородов, обуславливающая интенсивное испарение низкокипящих фракций. За счет морского течения и гравитационного растекания непрерывное истечение нефтегазовой смеси от подводного источника будет формировать шлейф пленки газоконденсата на морской поверхности. На рис. 2 шлейф поделен на несколько областей  $A_1, A_2, A_3$ , внутри которых концентрации фракций углеводородов будут меняться за счет испарения более легколетучих компонентов. По мере удаления от места выхода конденсата на поверхность моря концентрации летучих фракций углеводородов в жидкой фазе будут уменьшаться, и их поступление в атмосферу уменьшится. Таким образом, источником загазованности района аварийно-восстановительных работ будет ограниченная область внутри шлейфа газоконденсата на поверхности моря.

Согласно [12] основным критерием экологической опасности при открытом фонтанировании скважины является ее дебит. Характерные величины дебита газоконденсатных скважин 5—15 млн м<sup>3</sup>/сут (по газу). Поскольку в газоконденсатной системе содержатся и жидкие углеводороды (C5 + высш.), фонтанирование газоконденсатной скважины приведет кроме загрязнения атмосферы и к загрязнению морской среды жидкими нефтяными углеводородами.

#### Вычислительные эксперименты

Для оценки области интенсивного испарения из пятна разлива газоконденсата на поверхности были проведены вычислительные эксперименты А—F (см. ниже табл. 1) для двух вариантов расхода газа: 57,9 м<sup>3</sup>/с (5 млн м<sup>3</sup>/сут) и 173,6 м<sup>3</sup>/с (15 млн м<sup>3</sup>/сут),

что соответствует характерным минимальным и максимальным значениям согласно [12], и для двух значений глубины моря — 50 и 100 м, что примерно соответствует глубинам некоторых арктических месторождений России. Характерное значение содержания газового конденсата в пластовом продукте составляет 100 см<sup>3</sup> на 1 м<sup>3</sup> газа [12], что соответствует 1:10 по массе, такое соотношение принято для первых четырех вариантов расчетов. Некоторые авторы, однако, отмечают, что содержание газового конденсата может быть больше, например, Южно-Кириинское месторождение относится к категории высококонденсатных [13], для которых содержание жидкой фракции (C5 и выше) колеблется в диапазоне 100—500 г на 1 м<sup>3</sup> газа [14]. Для оценки этого фактора был выполнен вариант расчетов F с двукратно большим значением содержания газового конденсата относительно первых четырех сценариев (см. ниже табл. 1).

Для целей моделирования процесса испарения состав газоконденсата, определяемый в результате лабораторных испытаний<sup>1</sup>, представляется семнадцатью псевдокомпонентами. Модель процесса испарения нефтепродукта, которая используется в расчетах, подробно описана в работах [15; 16] и статье, посвященной современной версии модели нефтяного разлива гидродинамического типа SPILLMOD [17].

Для оценки области загрязнения морской поверхности газоконденсатом при непрерывном истечении из подводной скважины необходимо использовать математическую модель распространения нефтепродукта с учетом процесса интенсивного испарения, например [17], или полулагранжев подход к оценке области продолжающегося истечения нефтепродукта [18].

В рамках полулагранжева подхода рассмотрим эволюцию кольцевого элемента области пролива газоконденсата, движущегося под действием радиального течения, которое вызвано подъемом уров-

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

Таблица 1. Оценки параметров фонтана для вариантов модельных расчетов и некоторых аварий  
Table 1. Estimates of fountain parameters for model runs and some accidents

Вариант расчетов	Расход газа, млн м <sup>3</sup> /сут	Расход газа, м <sup>3</sup> /с	Расход жидкого нефтепродукта, м <sup>3</sup> /с	Глубина моря, м	Размер зоны влияния фонтана, м	$\alpha$	$H^*$ , м	$b^*$ , м	$u^*$ , м/с	$b(z=H)$ , м	$u/ u^*$	$u$ , м/с	Площадь лагранжева элемента, м <sup>2</sup>
Моделирование													
A	5	57,9	0,0078	100	537	0,19	110	40,7	1,0	21,5	2	2,6	403
B	15	173,6	0,0173	100	774	0,20	110	43,0	1,3	22,7	2	3,6	591
C	5	57,9	0,0078	50	328	0,19	60	22,2	1,9	10,7	2	3,9	302
D	15	173,6	0,0173	50	473	0,20	60	23,5	2,7	11,3	2	5,4	442
F	15	173,6	0,0347	100	774	0,20	110	43,0	1,3	22,7	2	3,6	591
Аварии													
«Северный поток-1»	~75	~872	—	75	~1200	0,21	85	35,8	3,5	18,3	2	7,0	
IXТОС-1	~2,8	~32	0,174	50	400	0,18	60	21,6	1,6	10,4	2	3,3	

ня воды в области фонтана. Для расчетов скорости горизонтального (радиального) течения в работе [5] предложено соотношение

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

где  $r$  — расстояние (радиус) от центра области выхода флюида на поверхность моря;  $u_s$  — скорость выхода подводного пузырькового шлейфа на поверхность моря;  $\beta$  — коэффициент вовлечения жидкости в горизонтальный поток в верхнем слое моря [8];  $b_s$  — радиус газовой фонтана на поверхности моря.

Для оценки параметров фонтана воспользуемся результатами работы [8], искомые переменные — вертикальная скорость на оси струи  $u$  и характерный радиус струи в горизонтальном направлении  $b$ . Из анализа данных наблюдений следует, что параметр вовлечения воды в пузырьковый шлейф  $\alpha$  зависит от расхода газа при нормальных условиях  $Q_{nc}$ :

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

Определим характерные масштабы:

$$H^* = H + \frac{p_0}{\rho_w g}, \quad b^* = 2\alpha H^*, \quad u^* = \left( \frac{g Q_H}{2\pi \alpha^2 H^*} \right)^{1/3}, \quad (4)$$

где  $H$  — глубина слоя воды;  $p_0$  — давление над свободной поверхностью (атмосферное давление);  $\rho_w$  — плотность воды;  $g$  — ускорение свободного падения;  $\alpha$  — коэффициент вовлечения;  $Q_H$  — объемный расход газа при давлении на глубине  $H$ ;

$$Q_H = Q_{nc} \left[ 1 / (1 + H/10) \right].$$

Оценим основные характеристики фонтана, воспользовавшись графиками зависимости радиуса фонтана и массовой скорости движения вещества на оси пузырькового шлейфа в переменных подобия  $b/b^*$ ,  $u/u^*$  из [8]. Итоговые значения параметров представлены в табл. 1, для сравнения приведены также сведения о двух известных крупномасштабных выбросах от подводных источников — при аварии на скважине IXТОС-1 и катастрофическом выбросе газа при повреждении газопровода «Северный поток-1» в Балтийском море в 2022 г. При расчете приведенных в табл. 1 значений параметров использовались соотношения (1) — (4), а также диаграммы, приведенные в цитированной работе. Последний столбец содержит площадь лагранжева элемента, который использовался при расчетах испарения для оценки зоны интенсивного испарения. Этот элемент представляет собой кольцевую область на расстоянии  $2b_s$  от точки выхода пузырькового шлейфа на поверхность моря, а его объем и площадь получены для длительности действия источника, равной 1 с.



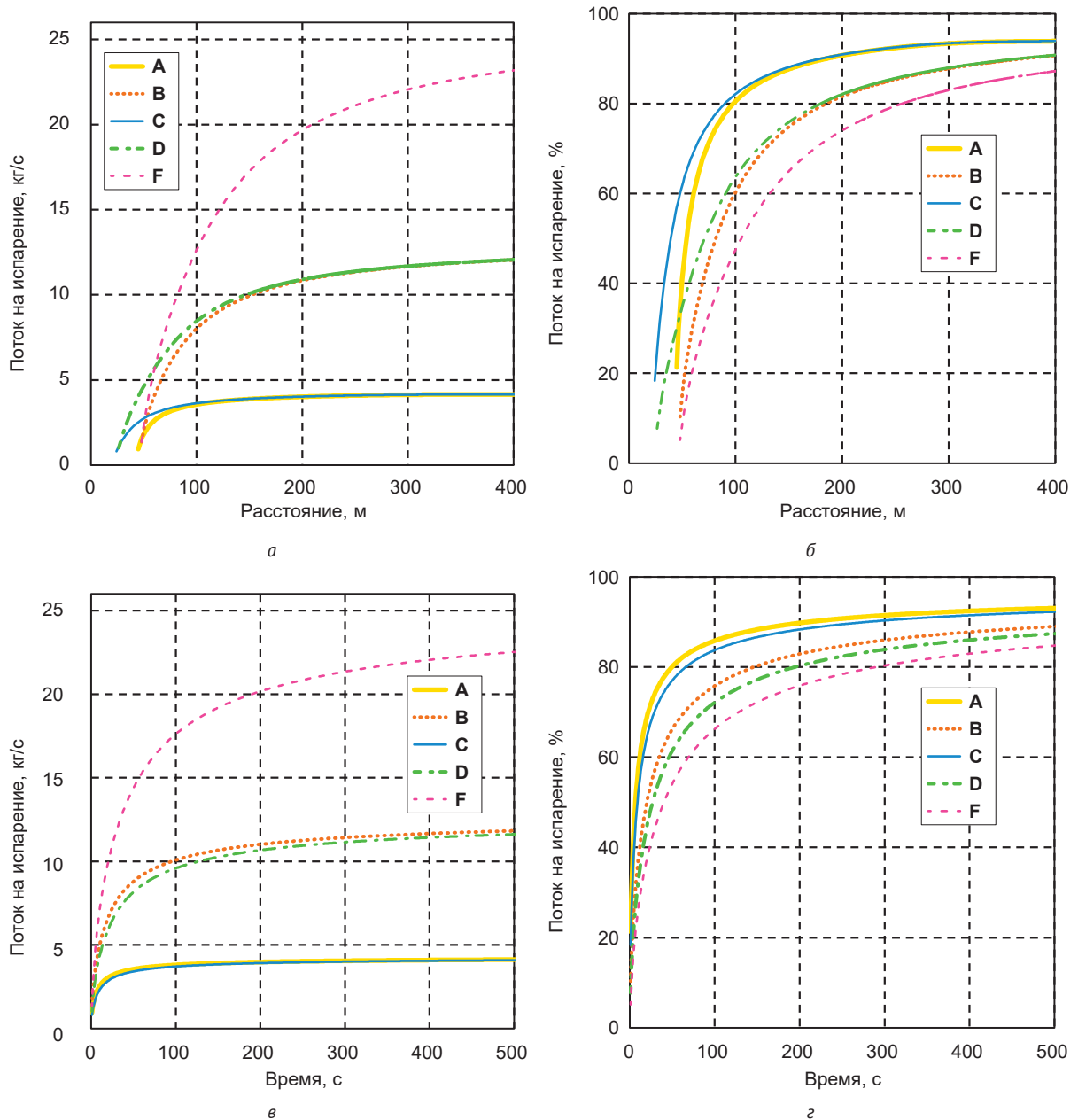


Рис. 3. Изменение потока газоконденсата в атмосферу в зависимости от времени и размера  
 Fig. 3. Time and size dependence of the hydrocarbon vapor flow

### Результаты исследований

Расчеты с использованием лагранжевых элементов

Результаты расчетов для пяти промоделированных вариантов/сценариев представлены на рис. 3. Приведенные графики позволяют оценить пространственные и временные масштабы исследуемого явления. Рис. 3а и 3б — это интегральные потоки на испарение из области, которая ограничена радиусом, отложенным на абсциссах графиков. Рис. 3а — потоки, выраженные в кг/с, рис. 3б — относительные потоки, нормированные на массовый расход источника газоконденсата. Видно, что для первых четырех вариантов сценариев расчета более 80% газоконденсата испаряется в пределах 200 м от места выхода фонтана на поверхность моря, для

пятого варианта этот параметр достигает 300 м. Учитывая специфику подводного выброса, следует отметить, что для всех вариантов расчетов распространение происходит на поверхности моря внутри области влияния фонтана, при этом значительная часть газового конденсата испаряется в пределах радиуса Топхэма — см. зависимость (1). Приведенные диаграммы на рис. 3в и 3г представляют собой интегральные потоки на испарение для совокупности лагранжевых элементов, эволюция которых происходит в пределах временного промежутка (отсчитывается от момента выхода на поверхность), отложенного по оси абсцисс. Аналогично графикам для расстояний от центра фонтана на рис. 3в — потоки, выраженные в кг/с, а на рис. 3г — относитель-

Таблица 2. Характеристики зон интенсивного испарения газоконденсата (80% и 90% общего потока)  
 Table 2. Characteristics of the zones of intensive evaporation of gas condensate (80% and 90% of the total flow)

№	Расстояние 2b, м	Расстояние «80%», м	Площадь «80%», км <sup>2</sup>	Расстояние «90%», м	Площадь «90%», км <sup>2</sup>	Расстояние «1e-3 г/м <sup>2</sup> /с», м	Площадь «1e-3 г/м <sup>2</sup> /с», км <sup>2</sup>
A	42,9	98	0,025	185	0,102	205	0,126
B	45,3	186	0,102	370	0,423	414	0,533
C	21,5	90	0,024	180	0,100	201	0,125
D	22,7	180	0,100	366	0,419	411	0,530
F	45,3	257	0,201	518	0,836	583	1,061

ные потоки, нормированные на массовый расход источника газового конденсата. Следует отметить, что в пределах 200 с в четырех первых вариантах (A—D) происходит испарение более 80% вышедшего газового конденсата, а для сценария расчетов 32 (F) значение этого параметра составляет приблизительно 300 с.

В табл. 2 приведены характеристики зон интенсивного испарения для вариантов модельных расчетов. Отметим, что приведенные площади соответствуют кольцевой зоне вокруг фонтана, которая не включает круговую область внутри двух радиусов фонтана на поверхности моря ( $r \leq 2b_s$ ). В табл. 2 также приведены оценки расстояния от центра фонтана и соответствующие площади испарения газоконденсата, внутри которых скорость испарения превышает  $10^{-3}$  г/м<sup>2</sup>/с.

Зависимость площадей интенсивного испарения ( $S_{80\%}$  и  $S_{90\%}$ ) от расхода жидкой фракции описывается с высокой точностью линейным законом

$$S_{80\%} = a_1 \frac{Q_r}{GOR}, \quad S_{90\%} = a_2 \frac{Q_r}{GOR}, \quad (5)$$

где GOR (gas oil relation) — отношение массы газа к массе газового конденсата в источнике.

### Результаты расчета подводного выброса газоконденсата с помощью CFD-модели SPILLMOD

Приведенные выше результаты расчетов лагранжевых элементов были получены в предположении значительного преобладания течения, инициированного газодводяным фонтаном, над фоновыми значениями морского течения. Такое упрощение на практике допустимо не всегда. Для реализации возможности получения оценок в более широком диапазоне гидрометеорологических условий была использована модель SPILLMOD, которая подробно описана в [17]. Газоконденсат также представляет-

ся в виде смеси 17 псевдокомпонентов с известными температурами кипения, молекулярными весами и плотностью. Новым в постановке задачи является включение в расчет «гидрологической сцены», скомбинированной из предложенной на основании относительно мелкомасштабных экспериментов модели радиального течения [5] и постоянной скорости течения независимой природы, например, дрейфовых или приливных. Структура радиальных течений [5] находит подтверждение в экспериментах на расстояниях порядка 10—20 радиусов фонтана. Для расчетов использовалось синтетическое поле скоростей течений, для построения которого использовались результаты экспериментов Топхэма [11], когда на некотором расстоянии, названном волновым кольцом (см. рис. 1б), радиальное течение обращается в ноль. Определим систему координат (x, y) таким образом, чтобы выход пузырькового шлейфа на поверхность соответствовал точке с координатами (0, 0). Тогда комбинированное поле течений в соответствии с вышесказанным определится как

$$\mathbf{u} = \begin{pmatrix} u_\infty \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \frac{\tilde{V}_m(r)}{r},$$

$$\tilde{V}_m(r) = [V_m(r) - V_m(R_T)] \times \quad (6)$$

$$\times \begin{cases} r/2b, & r < 2b, \\ 1, & 2b < r < R_T, \\ 0, & r > R_T, \end{cases}$$

где используются соотношения (1), (2) и  $u_\infty$  — скорость «фоновое» (внешнее) течения;  $r = (x^2 + y^2)^{1/2}$ .

Таким образом, модельное поле скоростей течений (6) вблизи центра фонтана соответствует [5], а к периферии значения скорости спадают, достигая фоновых значений. После начала действия

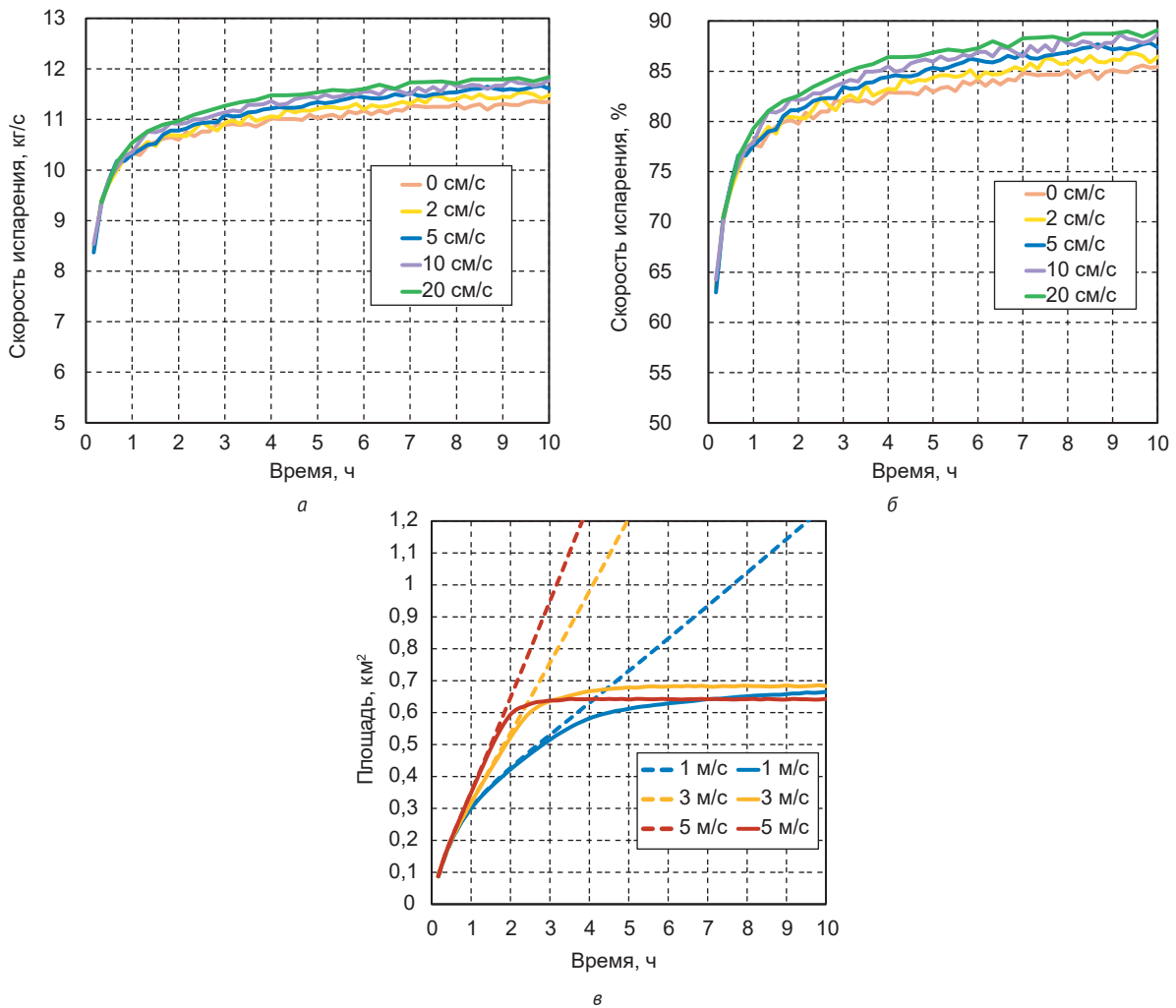


Рис. 4. Скорость испарения в зависимости от времени от начала сброса: а – абсолютная, б – относительная, в – площадь области, в которой скорость испарения превышает  $0,001 \text{ г/м}^2/\text{с}$

Fig. 4. Evaporation rate depending on the time from the discharge onset: а – absolute, б – relative, в – the region area in which the evaporation rate exceeds  $0,001 \text{ g/m}^2/\text{s}$

источника, который расположен в точке фонтанирования, эволюция поверхностного загрязнения происходит под действием скоростей течений и других гидрометеорологических характеристик. В таких условиях, несмотря на стационарность гидрометеорологической сцены, состояние абсолютного стационара в эволюции нефтяного разлива не достигается. Здесь можно ожидать выхода на стационар отдельных параметров нефтяного разлива. Как подтверждают расчеты, площадь зоны потока испаряющихся углеводородов со значениями, превышающими некоторое заданное, со временем возрастает от нуля, приближаясь к максимальному значению. На рис. 4а и 4б приведены потоки на испарение для непрерывно действующего источника при различных значениях внешнего фонового течения. Следует отметить, что величины этого параметра быстро приближаются к стационарному значению. При этом значение 80% ( $10,6 \text{ кг/с}$ ) мощности источника газоконденсата ( $13,3 \text{ кг/с}$ ) достигается сравнительно

быстро, в основном не более чем за час, что согласуется с расчетами лагранжевыми элементами (см. рис. 3). На рис. 4в приведена эволюция площади акватории, занимаемой разливом (пунктирная линия), и площади акватории, на которой поток на испарение превосходит значение  $0,001 \text{ г/м}^2/\text{с}$  (сплошные линии) в зависимости также от скорости ветра, значения которой приведены в легенде. Эти данные сопоставимы по значениям с данными табл. 2 (вариант D, последняя колонка).

На рис. 5 приведена конфигурация зон, ограничивающих области, где значения потока  $Q_e$  на испарение с единичной площади не превышают заданные значения. В результате расчетов было получено, что для больших значений потоков конфигурация (и площадь) слабо изменяется уже после одного-двух часов после начала действия источника, а для малого ( $0,001 \text{ г/м}^2/\text{с}$ ) — после шести часов. Этот вывод подтверждается также графиками эволюции площади зоны испарения, ограниченной значением



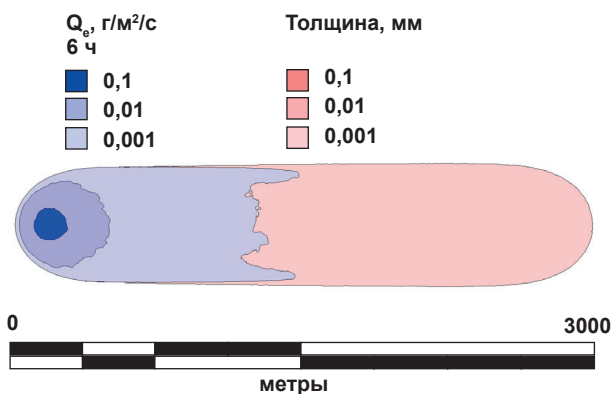


Рис.5. Распределение толщины газоконденсата на поверхности и скорости испарения для разлива 1500 м<sup>3</sup>/сут газоконденсата, скорость течения – 10 см/с, T = 6 ч после начала аварии Fig. 5. Oil film thickness and evaporation rate for a spill of 1500 m<sup>3</sup>/day condensate, flow speed – 10 cm/s, T = 6 h upon the accident onset

0,001 г/м<sup>2</sup>/с (сплошные линии), которые приведены на рис. 4в. Сплошные линии соответствуют рассматриваемым зонам, а пунктирные — общей площади разлива без указанного условия.

**Обсуждение результатов**

Как показано выше, область загрязнения поверхности моря жидкими углеводородами при подводном выбросе из мелководных скважин нефтепродуктами на поверхности моря существенным образом определяется специфическим течением в поверхностном слое моря, вызванным газовой фонтаном. Благодаря этому течению жидкие углеводороды быстро уносятся от района выхода нефтегазовой смеси на поверхность, образуя тонкий слой нефтепродуктов на поверхности. Такая особенность выхода подводных нефтегазовых выбросов, с одной стороны, затрудняет сбор нефтепродуктов с помощью скиммеров, а с другой — большая площадь свежих нефтепродуктов вокруг места выхода пузырькового шлейфа на поверхность является источником мощного испарения летучих фракций углеводородов при авариях на газоконденсатных скважинах.

Исследование феномена подводных нефтегазовых и газоконденсатных выбросов экспериментальным путем до настоящего времени ограничено малыми расходами газа и малыми по сравнению с природой глубинами. Экстраполяция результатов мелкомасштабных экспериментов на большие масштабы выбросов, вообще говоря, должна проводиться с осторожностью. Так, в классической работе [5] отмечено, что теоретическая модель осесимметричного течения вне области газовой фонтана подтверждается на расстояниях порядка 10—20 радиусов фонтана. За пределами этого масштаба предложенная модель течения не подтверждена. Качественный анализ дает основания полагать, что

схема течений в районе выброса, инициированная мощным пузырьковым шлейфом, соответствует схеме, показанной на рис. 26, однако кроме работы [11] оценки размеров «волнового кольца» не представлены в научной литературе. Для мелкомасштабных экспериментов в [2] предлагается использовать коэффициент вовлечения воды в пузырьковый шлейф, равный 0,1. Однако если следовать результатам анализа [8], то для рассматриваемых в данной статье выбросов газа следует выбрать коэффициент вовлечения равным 0,2. Этот параметр определяет в теории размеры фонтана на поверхности моря, но следует признать, что экстраполяция значений коэффициента вовлечения на область больших расходов газа требует дополнительного анализа.

Результаты полулагранжева моделирования, использованные в данной работе, показывают, что 80% разлива газоконденсата, появляющегося на поверхности моря с типовыми расходами в 7—40 л/с, испаряется в пределах 200—300 м от места выхода пузырькового шлейфа, что заметно ниже недостаточно подтвержденных масштабов волнового кольца или радиуса Топхема. Таким образом, моделирование начальных стадий выхода газоконденсата на поверхность моря дает основания для вывода, что в течение первых часов или десятков минут на поверхности формируется практически стационарная область мощного испарения, за пределами которой поступление паров углеводородов в атмосферу преобладающе мало.

В данной работе не рассматривалось испарение газоконденсата внутри области, ограниченной двумя радиусами фонтана, где предположительно имеет место мощный выход в атмосферу метана, присутствие которого может существенно затормозить испарение газоконденсата, с одной стороны, а с другой — в этой области жидкие фракции нефтепродуктов присутствуют преимущественно в виде капель, постепенно трансформирующихся в пленочную форму на периферии ядра фонтана.

В нашем исследовании на основании нескольких вычислительных экспериментов было получено, что площадь интенсивного испарения для характерных параметров газоконденсатных скважин определяется дебитом скважины и газовым фактором. Первый параметр определяет характеристики пузырькового шлейфа, а второй — количество жидкого нефтепродукта и соответственно поток испаряющихся углеводородов.

Полулагранжево моделирование в данной работе сравнивалось с сопоставимыми результатами гидродинамического моделирования разлива газоконденсата с помощью модели SPILLMOD на «гидрологической сцене», заданной соотношениями (6).

**Заключение**

В представленной работе проведен анализ процесса распространения газового конденсата и сделана оценка зон интенсивного испарения для

аварийного фонтанирования скважины газоконденсатного месторождения. В качестве исходных данных были взяты параметры пластового продукта, характерные для газоконденсатных месторождений российской Арктики и субполярных областей России. Получено, что размер зоны интенсивного испарения газового конденсата ограничен радиусом порядка 300 м типичных значений содержания газового конденсата в пластовом продукте. Следует отметить, что аварийное фонтанирование мелководной скважины приводит к действию на поверхности моря двух источников поступления нефтяных углеводородов в атмосферу, первый — в месте выхода газа (метана) локализуется в пределах первых десятков метров вблизи фонтана, второй (испарение газоконденсата) — распределен в пределах 100—300 м вблизи фонтана. Соотношение массовых расходов газа и газового конденсата находится в пределах от 10:1 до 5:1.

Проведение оценок для скважин конкретного месторождения, безусловно, потребует уточнения параметров и дополнительного моделирования для учета индивидуального набора характеристик аварийного фонтанирования, в том числе фракционного состава газового конденсата. Кроме того, может потребоваться построение более совершенной модели распространения пузырькового шлейфа в водной толще и модели движения жидкости в водной толще в целом. Математическое моделирование следует рассматривать как инструмент получения оценок размеров зоны, опасной для проведения противофонтанных мероприятий, при различных гидрометеорологических условиях, возможных в районе работ, при различных параметрах аварийных скважин и для планирования экспериментов, необходимых для подтверждения теоретических выводов и калибровки математических моделей.

### Литература/References

1. Nordvik A. B. The technology windows-of-opportunity for marine oil spill response as related to oil weathering and operations. *Spill Science & Technology Bull.*, 1995, vol. 2, no. 1, pp. 17—46.
2. Fannelop T. K., Bettelini M. Very Large Deep-Set Bubble Plumes From Broken Gas Pipelines. *Petroleumstilsynet*, 2007, 70 p.
3. 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.
4. 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.
5. Fannelop T. K., Sjøen K. Hydrodynamics of underwater blowouts. *Norwegian Maritime Res.*, 1980, 8 (4), pp. 17—33.
6. PCCI Marine and Environmental Engineering, “Oil Spill Containment, Remote Sensing and Tracking for Deepwater Blowouts: Status of Existing and Emerging Technologies,” MMS Purchase Order Number 1435-01-98-PO-15135, August 12, 1999.
7. Milgram J. H. Mean flow in round bubble plumes. *J. Fluid Mech.*, 1983, 133, pp. 345—376.
8. 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 / Рос. акад. наук, ВЦ им. А. А. Дородницына. — М.: Вычислит. центр РАН, 2007. — 74 с.
9. Koterov V. N., Arkhipov B. V., Solbakov V. V., Yurezanskaya Yu. S. Application of mathematical methods for the analysis and assessment of environmentally significant events in a large—scale accident of an underwater gas pipeline. Russian Academy of Sciences, A. A. Dorodnitsyn Scientific Center. Moscow, Calculate Center of the RAS, 2007, 74 p. (In Russian).
9. Ross S. L., Ross C. W., Lepine F., Langtry R. K. Ixtoc-I oil blowout. Researcher/Pierce Ixtoc-I Cruise. Washington, DC, NOAA, 1980, pp. 25—40.
10. Bloomberg: утечки газа на «Северных потоках» могут стать климатической катастрофой. — URL: <https://www.ntv.ru/novosti/2725752/>.
- Bloomberg: gas leaks on the Nord Streams could be a climate disaster. — Available at: <https://www.ntv.ru/novosti/2725752/>. (In Russian).
11. Topham D. R. Hydrodynamics of an oil well blowout, Beaufort Sea. *Institute of Ocean Science Tech. Rep.*, 1975, vol. 33.
12. 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. diss. ... Dr. Technical sciences. Vladivostok, 1992, 34 p. (In Russian).
13. Парфёнова Н. М., Григорьев Е. Б., Косякова Л. С., Шафиев И. М. Углеводородное сырье Южно-Киринского месторождения: газ, конденсат, нефть // Актуальные вопросы исследований пластовых систем месторождений углеводородов: Научно-технический сборник: Вести газовой науки. — 2016. — № 4 (28). — С. 133—145.
- Parfenova N. M., Grigoriev E. B., Kosyakova L. S., Shafiev I. M. Hydrocarbon raw materials of the Yuzhno-Kirinskoye field: gas, condensate, oil. Topical issues of research of reservoir systems of hydrocarbon deposits: Scientific and technical collection: Vesti gazovoi nauki, 2016, no. 4 (28), pp. 133—145. (In Russian).
14. Хавкин А. Я. Физика нефтегазовых пластов и нелинейные явления: Учебное пособие. — М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа (НИУ) им. И. М. Губкина, 2019. — 288 с.
- Khavkin A. Ya. Physics of oil and gas formations and nonlinear phenomena: A textbook. Moscow, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (NRU), 2019, 288 p. (In Russian).

15. 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.

Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Zhuravel V. I., Solbakov V. V. Investigation of the sensitivity of a pseudocomponent model of oil evaporation on the sea surface to parameter variations. Processes in geomedias, 2020, iss. 2, pp. 662—674. (In Russian).

16. 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.

Zatsepa 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).

17. Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., Solbakov V. V. SPILL-MOD — a CFD-model for information support of marine oil spill response. J. of oceanological research, 2022, vol. 50, no. 2, pp. 72—105.

18. 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. 428—443.

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).

### 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.

**Зацепя 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.

## ASSESSMENT OF THE ZONE OF INTENSE GAS CONDENSATE EVAPORATION DURING BLOWOUTS IN SHALLOW WELLS

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

<sup>1</sup> Federal Research Centre “Computer Science and Control” of the RAS (Moscow, Russian Federation)

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

### For citing

Solbakov V. V., Zatsepa 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).

The article was received on November 13, 2023

### Abstract

The paper reviews the approach of assessing mechanisms and factors determining the formation of a gas condensate spill from a shallow underwater emergency discharge at a gas condensate field. The researcher determine spatial and temporal formation scales of an intense evaporation zone for the characteristic flow rates of underwater wells, necessary for assessing the area of increased gas contamination in which it is impossible to carry out emergency recovery measures. They establish that the radial flow in the area where the gas-liquid plume exits the sea surface determines the size of the intense evaporation area; at low values of wind speed and currents, it depends on the well flow rate, gas factor and fractional composition of the oil product. The researchers have carried out calculations using the SPILLMOD model and the evolution model of a characteristic Lagrangian element in the spilling region.

**Keywords:** emergency blowout of gas condensate wells, evaporation of gas condensate, Arctic, mathematical modeling, Lagrangian elements, computational fluid dynamics, SPILLMOD, oil spill response plans.

---

### Information about the authors

**Solbakov, Viacheslav Viktorovich**, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Federal Research Center “Computer Science and Control” of the Russian Academy of Sciences (44/2, Vavilova street, 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, Kropotkinskiy Lane, Moscow, Russia, 119034), e-mail: zatsepa@gmail.com.

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

© Solbakov V. V., Zatsepa S. N., Ivchenko A. A., 2024