

Научная статья

УДК 553.981:551.462.32:004.942:656.085; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-70-80

ОЦЕНКА РАЗМЕРОВ ЗОНЫ ЗАГАЗОВАННОСТИ НАД ПОВЕРХНОСТЬЮ ВОДЫ ПРИ ФОНТАНИРОВАНИИ ГАЗОВОЙ СКВАЖИНЫ С ПОДВОДНЫМ УСТЬЕМ

✉Петрова Юлия Юрьевна;

Гамера Юрий Васильевич;

Дурум Анастасия Артуровна.

ООО «Газпром ВНИИГАЗ», Санкт-Петербург, Россия

✉PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru

Аннотация. Рассмотрен процесс распространения выбросов газа над поверхностью моря в случае аварийного фонтанирования газовой скважины с подводным устьем. Описан новый экспресс-метод расчета границ зоны загазованности, образованной выходящим на поверхность воды газом. В основу метода положена серия вычислительных экспериментов в программном комплексе «Toxi+Risk» с последующей аппроксимацией полученных результатов.

Ключевые слова: авария на шельфе, добыча газа на шельфе, скважина с подводным устьем, фонтанирующая скважина, зона загазованности

Для цитирования: Петрова Ю.Ю., Гамера Ю.В., Дурум А.А. Оценка размеров зоны загазованности над поверхностью воды при фонтанировании газовой скважины с подводным устьем // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 4 (72). С. 70–80. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-70-80.

Scientific article

ESTIMATE OF THE DIMENSIONS OF THE GASIFICATION ZONE ON THE WATER SURFACE WHEN AN UNDERWATER GAS WELL IS FLOWING

✉Petrova Yulia Yu.;

Gamera Yuriy V.;

Durum Anastasiya A.

Gazprom VNIIGAZ LLC, Saint-Petersburg, Russia

✉PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru

Abstract. The article considers the process of the spread of gas emissions on the sea surface when a gas well with an underwater head is accidentally flowing. A new express-method for calculating the boundaries of the gasification zone formed by gas exiting the water surface is described. The method is based on a series of computational experiments in the software complex «Toxi+Risk» with subsequent approximation of the obtained results.

Keywords: offshore accident, offshore gas production, underwater well, flowing well, gasification zone

For citation: Petrova Yu.Yu., Gamera Yu.V., Durum A.A. Estimate of the dimensions of the gasification zone on the water surface when an underwater gas well is flowing // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 4 (72). P. 70–80. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-4-70-80.

Введение

В связи со стремительной реализацией проектов по освоению морских углеводородных месторождений необходимо обеспечить безопасное проведение работ по ликвидации и локализации возможных открытых фонтанов на скважинах с подводным устьем, большинство которых проводится с помощью судов, буровых установок и морской техники. При этом во время эксплуатации скважин и трубопроводов на континентальном шельфе имеется большое количество угроз их повреждения, например, коррозия, механические повреждения различного характера, штормы, размыв дна, неправильная эксплуатация, разрушение материала, использованного при строительстве трубопроводов и скважин и др. [1]. Так, в случае фонтанирования скважины с подводным устьем на поверхности моря образуются зоны, которые могут представлять опасность для задействованной в ликвидации аварии морской техники, например, зона загазованности (взрывоопасное газовоздушное облако), зона снижения плотности воды и др.

Наиболее наглядным примером поражающих факторов, возникающих при авариях на подводных газопроводах, является происшествие в Мексиканском заливе, которое произошло 2 июля 2021 г. Результатом разгерметизации подводного газопровода, принадлежащего нефтегазовой компании Petroleos Mexicanos (Pemex), стал поток углеводородов, загоревшийся над поверхностью воды (рис. 1).



Рис. 1. Авария на газопроводе в Мексиканском заливе с воспламенением выходящего из-под воды газа (<https://hightech.fm/2021/07/05/fire-gulf-mexico>)

Также в качестве примера можно привести разгерметизацию газопроводов «Северный поток» и «Северный поток 2», произошедшую 26 сентября 2022 г. Всего было зафиксировано три утечки газа. На рис. 2 представлен снимок газожидкостного пятна, возникшего в результате истечения газа, и влияние на него течения.



Рис. 2. Авария на подводном газопроводе «Северный поток 2» (<https://tass.ru/ekonomika/15883589>)

Согласно современным исследованиям [2–9] развитие подводного выброса нефтегазовой смеси определяется рядом процессов.

Подводные выбросы газоконденсата или газа [2], как правило, характеризуются высокой скоростью выхода струи и протяженным участком со струйным характером течения, в котором можно пренебречь выталкивающей силой по сравнению с начальным импульсом. В результате выхода газа на поверхность моря формируются опасные для судов и буровых платформ зоны.

Основными по воздействию поражающими (опасными) факторами аварийных событий на скважинах с подводным устьем, морских добычных комплексах и трубопроводах являются:

- напор высокоскоростной газожидкостной струи (зона веерной струи);
- снижение плотности воды при выходе газа на поверхность;
- образование зоны высокой загазованности вблизи места разрыва.

В настоящей статье исследуется образование зоны высокой загазованности над поверхностью моря вблизи места аварии на скважине в условиях шельфа о. Сахалина.

Методика

В настоящее время существует отечественная методика, позволяющая моделировать распространение выбросов газа. Она описана в Руководстве по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ», утвержденном приказом Ростехнадзора «Об утверждении руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» от 2 нояб. 2022 г. № 385 [9], и реализована в рамках программного комплекса «Токсик+Risk». Однако использование «Токсик+Risk» не подходит для экспресс-расчетов зон загазованности с учетом вероятностного распределения метеопараметров. В связи с чем для определения оптимальной, обоснованной границы зоны загазованности при фонтанировании подводной газовой скважины был разработан универсальный математический подход. Проводилась серия математических экспериментов в программном комплексе «Токсик+Risk» для последующей аппроксимации результатов, далее полученные аппроксимационные зависимости легли в основу нового экспресс-метода оценки границ зоны загазованности над поверхностью воды.

Для проведения экспериментальных расчетов в программе был выбран наиболее близкий к моделируемому событию вариант – расчет рассеяния выбросов метана в атмосфере с площадного источника, который образуется при разгерметизации трубопровода, при варьируемых начальных параметрах: радиус пятна газовыделения, массовый аварийный расход, скорость ветра и класс устойчивости атмосферы.

Результатом каждого проведенного расчета являются пространственные распределения выбросов метана по плоскостям сечений XY и XZ. Для отображения выбиралась максимальная концентрация, которая достигалась в точке пространства за время моделирования рассеяния. В расчетной области на рисунках отображаются изолинии распространения выбросов для различных концентраций. Линии соответствуют верхнему концентрационному пределу воспламенения (ВКПВ), нижнему концентрационному пределу воспламенения (НКПВ) и предельно допустимой концентрации (ПДК).

В дополнение к рисункам заполнялись таблицы с размерами зон распространения выбросов метана для различных комбинаций начальных параметров: радиуса пятна газовыделения и массового аварийного расхода. Определение максимальной длины, ширины и высоты рассеяния выбросов метана проводилось графически по изолинии, соответствующей концентрации 0,3 НКПВ для трех плоскостей. Всего было проведено более 400 расчетов, для которых начальные параметры варьировались в следующих пределах: радиус пятна газовыделения – с 5 до 20 м, массовый аварийный расход – с 45 до 4 500 кг/с, скорость ветра – с 1 до 12 м/с, класс устойчивости атмосферы – от конвекции до инверсии.

Результаты

На рис. 3 представлены примеры получаемых пространственных распределений выбросов метана с отображенными изолиниями в XY- и XZ-сечениях для варьируемых класса устойчивости атмосферы и скорости ветра при фиксированных радиусе пятна газовыделения $R = 6$ м и массовом аварийном расходе $Q = 46$ кг/с. Соответствие цветов изображения изолиний с концентрационными пределами представлено в табл. 1.

Таблица 1

Цветовая легенда к рисункам 3–6

Концентрационный предел	Концентрация, кг/м ³	Цвет изолинии
ПДК	0,007	Оливковый
ВКПВ	0,109	Фиолетовый
НКПВ	0,034	Красный
0,5 НКПВ	0,017	Синий
0,3 НКПВ	0,0102	Зеленый

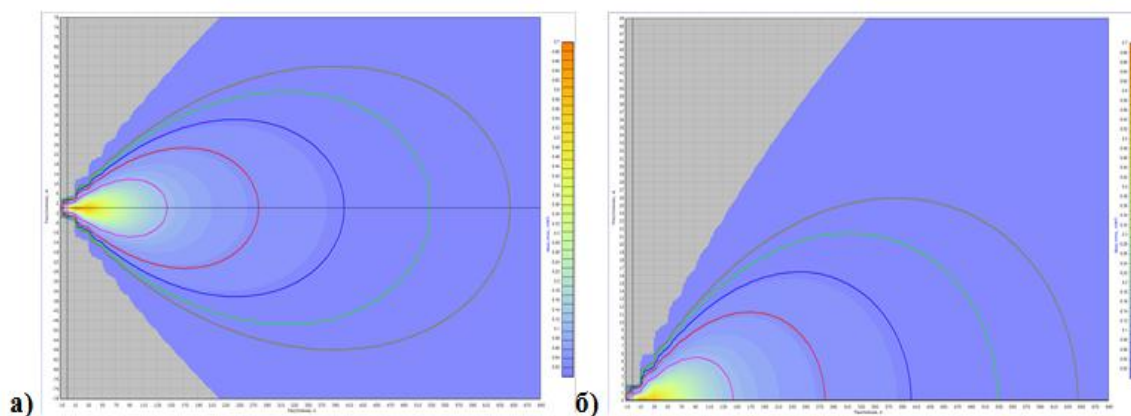


Рис. 3. Пространственное распределение выброса метана для класса устойчивости атмосферы Конвекция С и скорости ветра 1 м/с:
а – сечение XY; б – сечение XZ

В качестве примера получаемых из пространственных распределений загазованности значений для радиуса пятна газовыделения $R = 6$ м при массовом аварийном расходе $Q = 46$ кг/с приведена табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов размеров зон распространения выбросов метана для радиуса пятна газовыделения $R = 6$ м при массовом аварийном расходе $Q = 46$ кг/с

Скорость ветра, м/с	Класс устойчивости атмосферы	Длина зоны НКПВ по ветру, м	Размеры зоны НКПВ*0,3, м		
			Xmax	2*Ymax	Zmax
1	Конвекция – А	278,36	529,12	95,36	21,48
1	Конвекция – В	278,36	529,12	95,36	21,48
2,5	Конвекция – В	174,02	328,4	59,3	13,65
4	Конвекция – В	136,95	258,3	47,18	10,79
1	Конвекция – С	278,36	529,12	95,36	21,48
2,5	Конвекция – С	174,02	328,4	59,3	13,65
4	Конвекция – С	136,95	258,3	47,18	10,79

Скорость ветра, м/с	Класс устойчивости атмосферы	Длина зоны НКПВ по ветру, м	Размеры зоны НКПВ*0,3, м		
			Xmax	2*Ymax	Zmax
5,5	Конвекция – С	116,47	219,11	40,22	9,25
12	Конвекция – С	78,43	147,35	27,08	6,32
1	Изотермия – D	389,71	751,53	96,94	21,14
2,5	Изотермия – D	240,62	461,9	60,12	13,65
4	Изотермия – D	188,25	360,32	47,48	10,87
5,5	Изотермия – D	159,51	304,84	40,02	9,32
12	Изотермия – D	106,5	202,54	26,96	6,36
2,5	Инверсия – E	358,34	698,88	66,98	12,23
4	Инверсия – E	279,38	540,72	52,26	9,79
1	Инверсия – F	585,83	1136	109,22	18,89

Далее размеры зон, ограничивающие распространение природного газа с концентрациями НКПВ ($R_{\text{НКПВ}}(Q, u)$ и 0,3 НКПВ ($X(Q, u), Y(Q, u), Z(Q, u)$), были систематизированы, обработаны методами математической статистики и аппроксимированы удобными зависимостями.

При конвекции (класс устойчивости атмосферы по Паскуилу А, В, С):

$$R_{\text{НКПВ,К}}(Q, u) = \exp(3,666 \cdot u^{-0,168}) \cdot Q^{0,519};$$

$$X_{\text{К}}(Q, u) = \exp(4,272 \cdot u^{-0,143}) \cdot Q^{0,528};$$

$$Y_{\text{К}}(Q, u) = \exp(2,609 \cdot u^{-0,246}) \cdot Q^{0,513};$$

$$Z_{\text{К}}(Q, u) = \exp(1,895 - 0,789 \cdot u + 0,181 \cdot u^2 - 0,02 \cdot u^3 + 7,908 \cdot 10^{-4} \cdot u^4) \cdot Q^{0,475}.$$

При изотермии (класс устойчивости атмосферы по Паскуилу D):

$$R_{\text{НКПВ,ИЗ}}(Q, u) = \exp(3,943 \cdot u^{-0,158}) \cdot Q^{0,534};$$

$$X_{\text{ИЗ}}(Q, u) = \exp(4,563 \cdot u^{-0,138}) \cdot Q^{0,546};$$

$$Y_{\text{ИЗ}}(Q, u) = \exp(2,557 \cdot u^{-0,251}) \cdot Q^{0,527};$$

$$Z_{\text{ИЗ}}(Q, u) = \exp(1,897 - 0,689 \cdot u + 0,128 \cdot u^2 - 0,011 \cdot u^3 + 3,495 \cdot 10^{-4} \cdot u^4) \cdot Q^{0,47}.$$

При инверсии (класс устойчивости атмосферы по Паскуилу E, F):

$$R_{\text{НКПВ,ИН}}(Q, u) = \exp(4,284 \cdot u^{-0,145}) \cdot Q^{0,55};$$

$$X_{\text{ИН}}(Q, u) = \exp(4,928 \cdot u^{-0,136}) \cdot Q^{0,566};$$

$$Y_{\text{ИН}}(Q, u) = \exp(2,484 \cdot u^{-0,182}) \cdot Q^{0,55};$$

$$Z_{\text{ИН}}(Q, u) = \exp(1,31 \cdot u^{-0,63}) \cdot Q^{0,451},$$

где u – скорость ветра, м/с; Q – массовый аварийный расход, кг/с.

На рис. 4–7 приведена корреляция между аппроксимационными зависимостями и данными вычислительных экспериментов. Из приведенных рисунков видно, что в консервативном приближении аппроксимационные зависимости вполне репрезентативны и могут использоваться для проведения оперативного экспресс-анализа размеров зон загазованности.

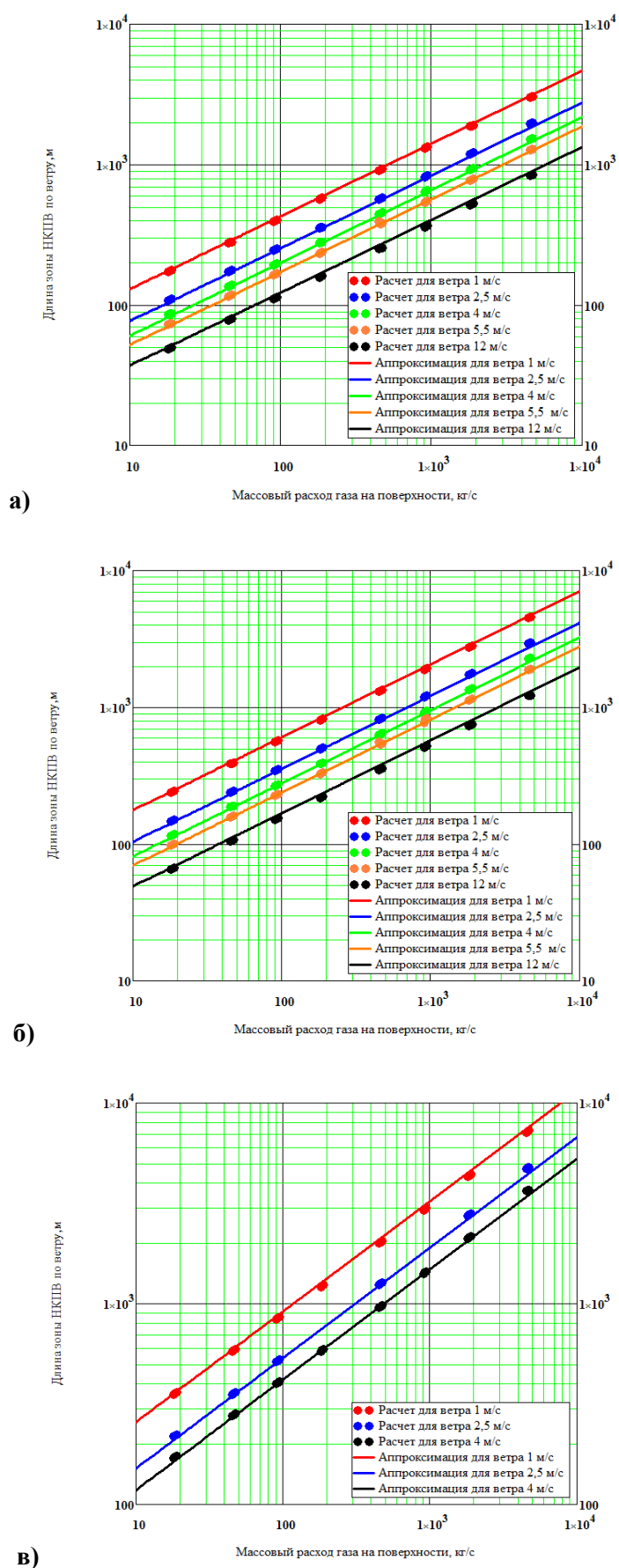


Рис. 4. Зависимость от массового расхода газа длины зоны НКПВ по ветру:
а – при конвекции; б – при изотермии; в – при инверсии

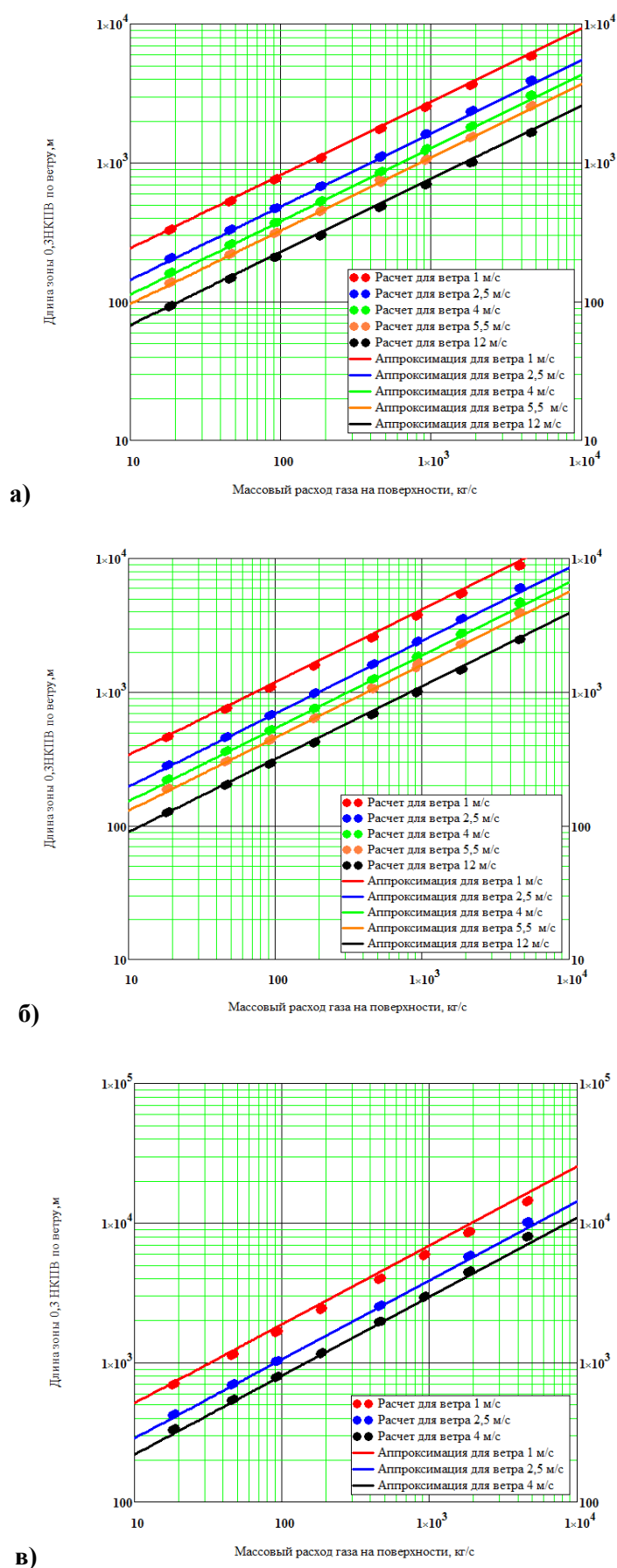


Рис. 5. Зависимость от массового расхода газа длины зоны 0,3 НКПВ по ветру: а – при конвекции; б – при изотермии; в – при инверсии

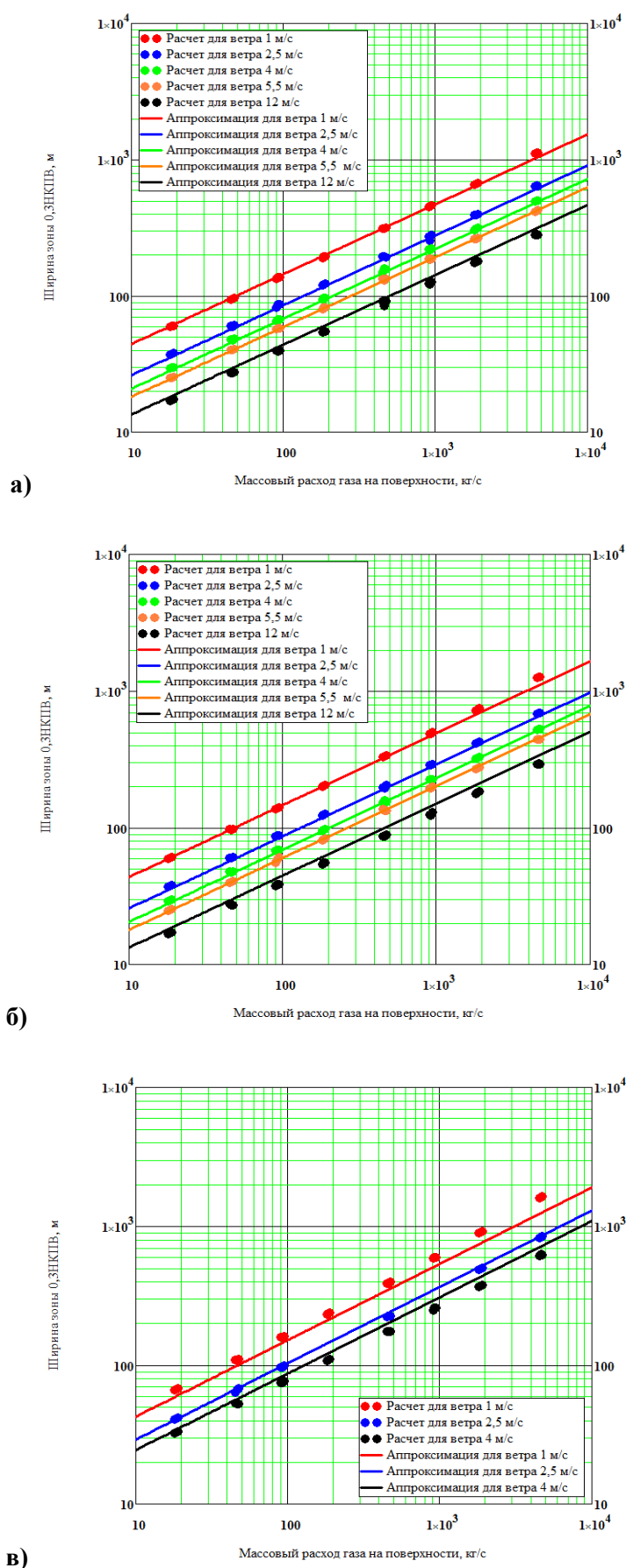
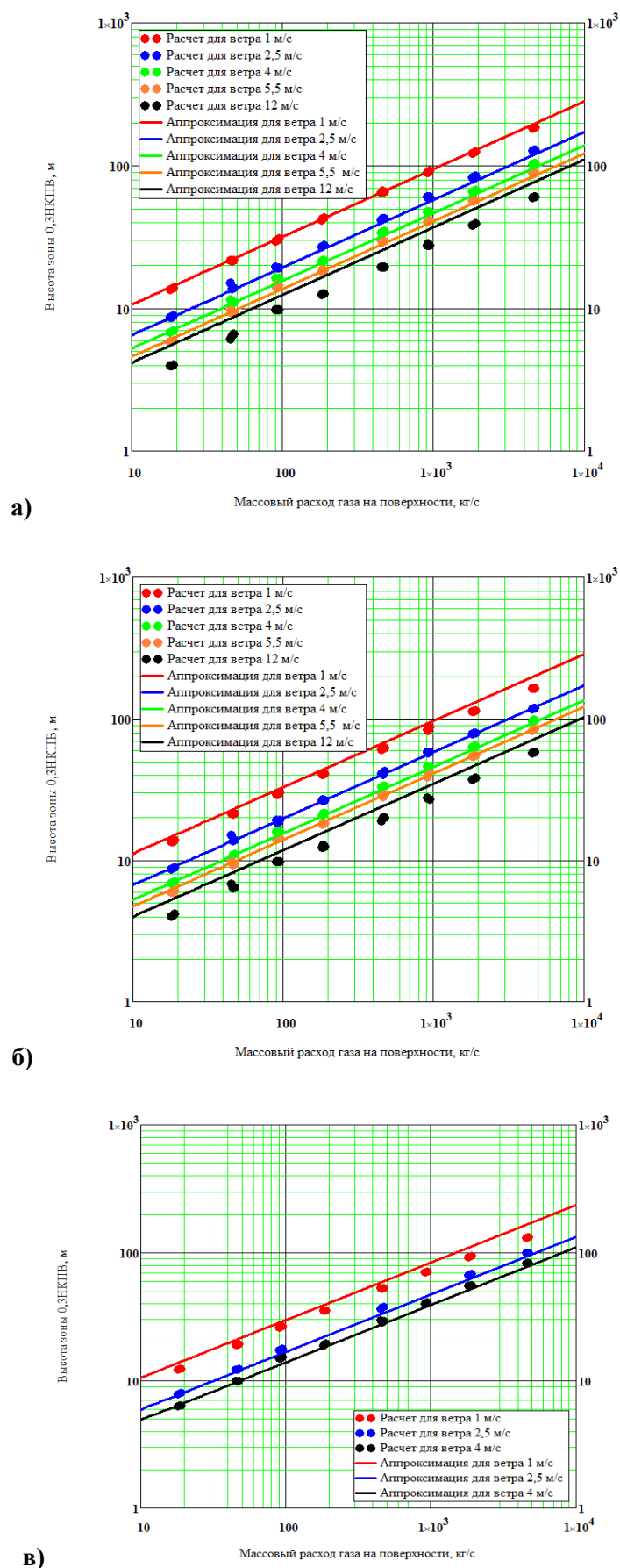


Рис. 6. Зависимость от массового расхода газа ширины зоны 0,3 НКПВ:
а – при конвекции; б – при изотермии; в – при инверсии



Заключение

В результате проведенных исследований:

- разработан способ расчета границ зоны загазованности, создаваемой выходящим на поверхность воды газом при фонтанировании подводной скважины;
- проведены расчеты границ зоны загазованности при фонтанировании подводной газовой скважины при характерных для акватории месторождения наборах метеопараметров.

Список источников

1. Аварийность на морских объектах нефтегазовых месторождений / М.В. Лисанов [и др.] // OilandGasJournalRussia. 2010. № 5 (39).
2. Применение математических методов для анализа и оценки экологически значимых событий при крупномасштабной аварии подводного газопровода / В.Н. Котеров [и др.]. М.: ВЦ РАН, Сообщения по прикладной математике, 2007. 74 с.
3. Котеров В.Н., Юрезанская Ю.С. Моделирование переноса взвешенных веществ на океаническом шельфе. Горизонтальное рассеяние // Журнал вычислительной математики и математической физики. 2010. Т. 50. № 2. С. 375–387.
4. Зацепя С.Н. Исследование процессов распространения нефтяных разливов на поверхности моря методами математического моделирования: дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М., 2023. 315 с.
5. Friedl MJ. Bubble plumes and their interactions with the water surface: dissertation № 12667. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1998.
6. Johansen O. DeepBlow – a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts // Spill Science & Technology Bulletin. 2000. Vol. 6. № 2. P. 103–111.
7. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation // Journal of Hydraulic Research. 2002. Vol. 41. № 4. P. 339–351.
8. Fannelop T.K., Sjoen K. Hydrodynamics of underwater blowouts // 18th Aerospace Science Meeting. Pasadena, 1980. P. 7–33.
9. Об утверждении руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ»: приказ Ростехнадзора от 2 нояб. 2022 г. № 385. Доступ из инф.-правового портала «Гарант».

References

1. Avarijnost' na morskikh ob"ektah neftegazovyh mestorozhdenij / M.V. Lisanov [i dr.] // OilandGasJournalRussia. 2010. № 5 (39).
2. Primenenie matematicheskikh metodov dlya analiza i ocenki ekologicheski znachimyh sobytij pri krupnomasshtabnoj avarii podvodnogo gazoprovoda / V.N. Koterov [i dr.]. M.: VC RAN, Soobshcheniya po prikladnoj matematike, 2007. 74 s.
3. Koterov V.N., Yurezanskaya Yu.S. Modelirovanie perenosa vzveshennykh veshchestv na okeanicheskom shel'fe. Gorizonta'l'noe rasseyanie // Zhurnal vychislitel'noj matematiki i matematicheskoy fiziki 2010. T. 50. № 2. S. 375–387.
4. Zacepa S.N. Issledovanie processov rasprostraneniya neftyanyh razlivov na poverhnosti morya metodami matematicheskogo modelirovaniya: dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk. M., 2023. 315 s.
5. Friedl MJ. Bubble plumes and their interactions with the water surface: dissertation № 12667. Swiss Federal Institute of Technology (ETH), 1998.
6. Johansen O. DeepBlow – a Lagrangian Plume Model for Deep Water Blowouts // Spill Science & Technology Bulletin. 2000. Vol. 6. № 2. P. 103–111.
7. Zheng L., Yapa P.D., Chen F. A model for simulating deepwater oil and gas blowouts – Part I: Theory and model formulation // Journal of Hydraulic Research. 2002. Vol. 41. № 4. P. 339–351.
8. Fannelop T.K., Sjoen K. Hydrodynamics of underwater blowouts // 18th Aerospace Science Meeting. Pasadena, 1980. P. 7–33.

10. Ob utverzhdenii rukovodstva po bezopasnosti «Metodika modelirovaniya rasprostraneniya avarijnyh vybrosov opasnyh veshchestv»: prikaz Rostekhnadzora ot 2 noyab. 2022 g. № 385. Dostup iz inf.-pravovogo portala «Garant».

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 28.08.2024; одобрена после рецензирования: 29.10.2024; принята к публикации: 15.11.2024

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 28.08.2024; approved after review: 29.10.2024; accepted for publication: 15.11.2024

Информация об авторах:

Петрова Юлия Юрьевна, начальник лаборатории анализа риска на опасных производственных объектах Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр. Малоохтинский, д. 45, лит. А, помещ. 2-Н, оф. 812), кандидат физико-математических наук, e-mail: PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru, SPIN-код: 1199-0957

Гамера Юрий Васильевич, ведущий научный сотрудник лаборатории анализа риска на опасных производственных объектах Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр. Малоохтинский, д. 45, лит. А, помещ. 2-Н, оф. 812), кандидат физико-математических наук, e-mail: Y_Gamera@vniigaz.gazprom.ru, SPIN-код: 7414-0631

Дурум Анастасия Артуровна, младший научный сотрудник лаборатории анализа риска на опасных производственных объектах Центра производственной безопасности ООО «Газпром ВНИИГАЗ» (195112, Санкт-Петербург, вн. тер. г. муниципальный округ Малая Охта, пр. Малоохтинский, д. 45, лит. А, помещ. 2-Н, оф. 812), e-mail: A_Durum@vniigaz.gazprom.ru, SPIN-код: 7017-6744

Information about the authors:

Petrova Yulia Yu., head of the laboratory for risk analysis at hazardous industrial sites of the center for industrial safety of Gazprom VNIIGAZ LLC (195112, Saint-Petersburg, st. ter. Malaya Okhta municipal district, pr. Malokhtinsky, d. 45, let. A, para. 2-N, of. 812), candidate of physical and mathematical sciences, e-mail: PetrovaYY@vniigaz.gazprom.ru, SPIN: 1199-0957

Gamera Yuriy V., leading research associate of the laboratory for risk analysis at hazardous industrial sites of the center for industrial safety of Gazprom VNIIGAZ LLC (195112, Saint-Petersburg, st. ter. Malaya Okhta municipal district, pr. Malokhtinsky, d. 45, let. A, para. 2-N, of. 812), candidate of physical and mathematical sciences, e-mail: Y_Gamera@vniigaz.gazprom.ru, SPIN: 7414-0631

Durum Anastasiya A., junior research associate of the laboratory for risk analysis at hazardous industrial sites of the center for industrial safety of Gazprom VNIIGAZ LLC (195112, Saint-Petersburg, st. ter. Malaya Okhta municipal district, pr. Malokhtinsky, d. 45, let. A, para. 2-N, of. 812), e-mail: A_Durum@vniigaz.gazprom.ru, SPIN: 7017-6744