



ISSN: 2658–5782

Номер 4

2024

# МНОГОФАЗНЫЕ СИСТЕМЫ

[mfs.uimech.org](https://mfs.uimech.org)





## Характерные режимы истечения углеводородов при глубоководных авариях

С.Р. Кильдибаева, Э.И. Харисов, Э.Э. Суяргулова

Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак

E-mail: [freya.13@mail.ru](mailto:freya.13@mail.ru)

Исследование утечек нефти, возникающих при аварийных глубоководных истечениях углеводородов из поврежденной скважины в случаях разработки месторождений в шельфе Мирового океана, имеет большое значение для безопасной добычи углеводородов. Для уменьшения времени ликвидации таких утечек важно понимать динамику распространения углеводородов: их траекторию, состав, температуру, скорость и т.д. В настоящей работе рассмотрены этапы течения углеводородов (нефть, газ, гидрат) для случаев их глубоководного истечения из поврежденной скважины; исследованы основные теплофизические зависимости, характерные координаты перехода этапов течения; проанализирована динамика изменения координаты перехода струи в шлейф в зависимости от начальных условий. Для расчетов использован модифицированный интегральный Лагранжевый метод контрольного объема.

**Ключевые слова:** углеводороды, затопленные струи

Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10227

## Characteristic modes of hydrocarbon leakage during deep-water accidents

S.R. Kildibaeva, E.I. Kharisov, E.E. Suyargulova

Sterlitamak branch of Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak, Russia

E-mail: [freya.13@mail.ru](mailto:freya.13@mail.ru)

Investigation of oil leaks that occur during emergency deep-water hydrocarbon outflows from a damaged well in cases of deposit development on the World Ocean shelf is of great importance for the safe production of hydrocarbons. To reduce the time required to eliminate those types of spills it is important to understand the hydrocarbon dispersion dynamics: trajectory, contents, temperature, velocity, etc. Article considers hydrocarbon flow (oil, gas, hydrate) for cases of their deep-water outflow from a damaged well, main thermophysical dependencies, typical stage transition coordinates, and coordinate change dynamics of transition of jet to plume depending on the initial conditions was analysed. Integral Lagrangian method of control volume was used for calculations.

**Keywords:** hydrocarbons, submerged jets

### 1. Введение

Разработка глубоководных залежей нефти в Мировом океане притягательна в связи с практически нетронутыми запасами добываемых углеводородов. Опасность такой добычи связана с высокой вероятностью загрязнения водной акватории в случае техногенной утечки. Нефть, поднимаясь на поверхность водоема, образует тонкую пленку, которая нарушает кислородный обмен, необходимый для живых организмов. В связи с этим необходимо не только предпринимать профилактические меры во избежание аварийных утечек, но и разрабатывать методы прогнозирования распространения углеводородов, что в случае аварии позволит сократить время ликвидации утечки. Одной из ключевых

особенностей глубоководных утечек является образование газогидратов, наличие которых существенно влияет на динамику течения и усложняет процесс транспортировки и хранения газа [1–5]. При разливе нефти в Мексиканском заливе при одной из крупнейших в истории добычи нефти техногенных катастроф [6] образование газогидратов не позволило установить железобетонный купол, который предназначен для устранения утечки. Газовые гидраты, накапливаясь внутри купола, придавали куполу нежелательную плавучесть и не позволяли закрепить устройство.

В [4, 5, 7] было выполнено математическое моделирование работы устройства, предназначенного для ликвидации разлива. Для прогнозирования масштабов

загрязнения водоемов нефтепродуктами необходимо исследовать особенности углеводородных течений: траекторию, скорость распространения, температуру, фазовые превращения, сопровождающие гидратообразование и т.д. Для этого необходимо рассмотреть этапы миграции углеводородов от источника (поврежденная скважина или трубопровод) до поверхности водоема.

Ранее в работах [8–10] были рассмотрены особенности течения многофазных затопленных струй на начальном этапе. В [8] представлена математическая модель течения с двумя предельными схемами гидратообразования, в работе [9] приводятся основные результаты лабораторного эксперимента по изучению траектории струи дизельного топлива. В исследовании [10] рассмотрена трехмерная визуализация течения углеводородов. Целью настоящей работы является исследование процесса перехода струйного этапа течения в шлейфовое.

## 2. Постановка задачи

Течение углеводородов определяется следующими начальными условиями: радиус источника истечения  $r$ , объемный расход поступающих углеводородов (нефть и газ), теплофизические характеристики окружающей среды и поступающих из источника углеводородов.

Для прогнозирования масштабов загрязнения водоемов нефтью необходимо рассмотреть три этапа течения углеводородов: турбулентная струя (jet), плюм (plume) и капельно-пузырьковый режим (схема течения представлена на рис. 1). Введем координату  $z_{jp}$ , характеризующую границу раздела между областью струйного течения, в которой доминирует начальный импульс потока (этап 1) и областью шлейфоподобного течения, в которой доминирует плавучесть (этап 2). То есть удельный импульс силы плавучести начинает превышать начальный удельный импульс струи. Согласно работам [11, 12]  $z_{jp}$  определяется следующим образом:

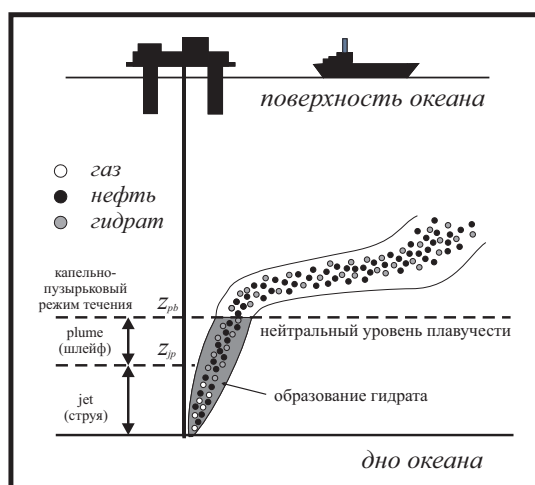


Рис. 1. Этапы течения струи:  $z_{jp}$  — координата перехода струи в шлейф;  $z_{pb}$  — координата перехода шлейфа в пузырьково-капельный режим

$$z = \frac{M_0^{\frac{3}{4}}}{\sqrt{J_0}} \quad (1)$$

где  $M_0 = u_0^2 a_0$  — поток импульса;  $u_0$  — скорость у источника (начальная);  $a_0$  — площадь поперечного сечения трубы;  $J_0 = u_0 a_0 g'$  — поток плавучести у источника;  $g' = \frac{(\rho_c - \rho_d)}{\rho_c} g$  — приведенное ускорение силы тяжести;  $\rho_c$  и  $\rho_d$  — плотность сплошной и дисперсной фаз соответственно;  $g$  — ускорение силы тяжести.

Формула (1) описывает миграцию углеводородов в стоячей воде, когда подводное течение отсутствует. На третьем этапе течения плотность и скорость распространения шлейфа становятся постоянными. Таким образом, выше координаты  $z_{pb}$  вовлечение окружающей воды в течение не происходит, а компоненты шлейфа (капли нефти, пузырьки газа, гидратные частицы) мигрируют независимо.

Для моделирования течения углеводородов на этапах турбулентной струи и шлейфа использован модифицированный интегральный Лагранжевый метод контрольного объема (ИЛМКО) [8, 13–16], согласно которому течение углеводородов описывается миграцией элементарных контрольных объемов цилиндрической формы. Моделирование течения углеводородов методом ИЛМКО подробно описано в работах [8, 10].

## 3. Результаты вычислительных экспериментов и анализ критического значения координаты перехода этапов 1 и 2

Расчеты проводились для следующих начальных параметров:  $P = 15$  МПа, радиус скважины  $r_0 = 0.1$  м,  $\rho_0 = 650$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_n = 910$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w = 1030$  кг/м<sup>3</sup>,  $a_g = 10^{-3}$  м,  $Q_g^e = 0.5$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_0^e = 0.5$  м<sup>3</sup>/с.

На рис. 2 представлены границы и осевая линия струи и шлейфа (а) и зависимости скорости течения от вертикальной координаты (б). Рассмотрен случай когда течение отсутствует. Координаты перехода между этапами струи и шлейфа:  $z_{jp} = 3.23$  м, а также между этапами шлейфа и капельно-пузырькового режима  $z_{pb} = 13.27$  м.

Рассмотрим динамику изменения координаты раздела для этапов течения струи и шлейфа при различных начальных условиях. Для расчета использовано уравнение (1). Начальные объемные расходы соответствуют значениям  $Q_g^e = 0.01$  м<sup>3</sup>/с,  $Q_0^e = 0.01$  м<sup>3</sup>/с, диаметр источника  $d = 0.2$  м. На рис. 3 представлена зависимость отношения  $z_{jp}/d$  (координаты раздела двух этапов течения к диаметру источника) от  $Q$  (общий объемный расход нефти и газа). С целью определения влияния массового содержания компонент струйного течения на динамику миграции углеводородов и перехода струйного течения в шлейфовое была проведена серия вычислительных экспериментов. В первом случае изменялся начальный объемный расход газа (белые символы). Было проведено 10 вычислительных экспери-

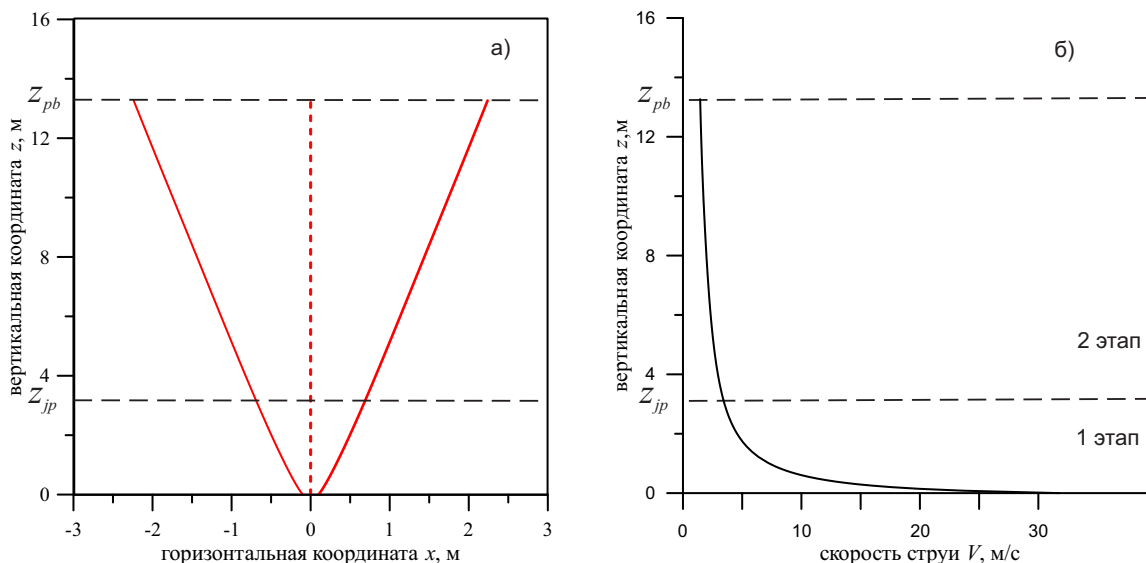


Рис. 2. Границы и осевая линия струи и шлейфа при отсутствии течения (а), зависимость скорости углеводородов от вертикальной координаты для первых двух этапов течения (б)

ментов, каждый раз начальный объемный расход газа увеличивался на 20 %. Во втором случае аналогично изменялся начальный объемный расход нефти (черные символы). Из графика видно, что зависимость  $z_{jp}/d$  от  $Q$  имеет линейный характер, однако, в случае, когда изменялся объемный расход газа (белые символы), координата раздела растет интенсивнее. Это связано с более высокой скоростью миграции углеводородов (эта зависимость представлена на рис. 4).

#### 4. Заключение

В работе рассмотрены этапы течения углеводородов, которые возникают при аварийных глубоководных истечениях из поврежденной скважины: турбулентная струя, шлейф, капельно-пузырьковый режим. Получены траектория течения углеводородов для случая отсутствия течения и зависимость скорости миграции углеводородов от вертикальной координаты для этапов 1 и 2 течения. Проанализирована динамика изменения координаты перехода струйного течения в шлейфовое в зависимости от начальных условий и состава течения.

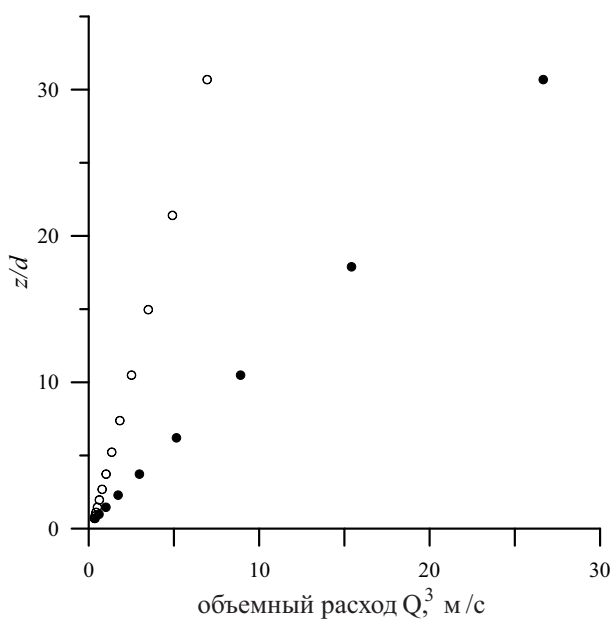


Рис. 3. Зависимость отношения координаты раздела этапов к диаметру источника от объемного расхода

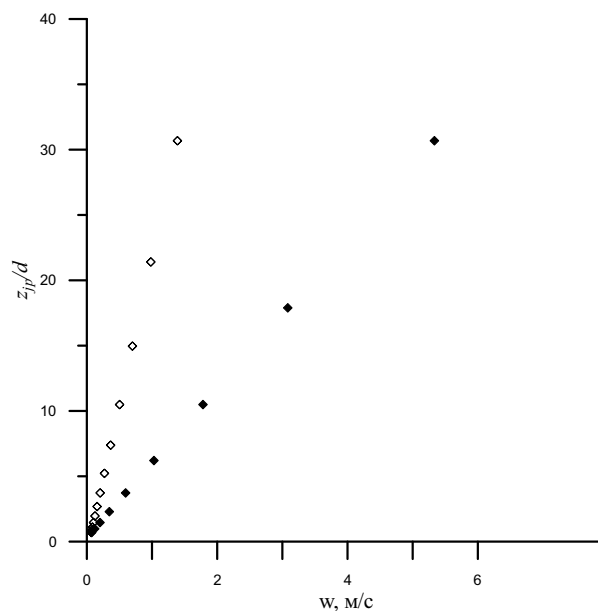


Рис. 4. Зависимость  $z_{jp}/d$  от скорости

## Список литературы / References

- [1] Бондарев Э.А., Рожин И.И., Аргунова К.К. Обобщенная математическая модель образования гидратов в магистральных газопроводах // Прикладная механика и техническая физика. 2019. Т. 60, № 3(355). С. 120–127.  
DOI: [10.15372/PMTF20190312](https://doi.org/10.15372/PMTF20190312)  
Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Generalised Mathematical Model of Hydrate Formation in Main Gas Pipelines // Applied Mechanics and Technical Physics. 2019. Vol. 60 (3). Pp. 503–509.  
DOI: [10.1134/S002189441903012X](https://doi.org/10.1134/S002189441903012X)
- [2] Рожин И.И., Иванов Г.И. Моделирование образования гидратных пробок при совместной работе газоносного пласта и скважины для случая зависимости равновесных условий гидратообразования от состава пластовых вод // Прикладная механика и техническая физика. 2023. Т. 64, № 2(378). С. 127–142.  
Rozhin I.I., Ivanov G.I. Modelling of hydrate plug formation during joint operation of gas-bearing reservoir and well for the case of dependence of equilibrium conditions of hydrate formation on the composition of formation water // Applied Mechanics and Technical Physics. 2023. V. 64, No. 2(378). Pp. 127–142 (In Russian).  
DOI: [10.15372/PMTF202215120](https://doi.org/10.15372/PMTF202215120)
- [3] Мусакаев Н.Г., Уразов Р.Р., Шагапов В.Ш. Динамика образования гидратов при транспортировке природного газа // Теплофизика и аэромеханика. 2006. Т. 13, № 2. С. 295–302.  
EDN: [hvuvkp](https://www.edn.ru/hvuvkp)  
Musakaev N.G., Urazov R.R., Shagapov V.Sh. Hydrate formation kinetics in piped natural-gas flows // Thermophysics and Aeromechanics. 2006. Vol. 13, No. 2. Pp. 275–281.  
DOI: [10.1134/S0869864306020090](https://doi.org/10.1134/S0869864306020090)
- [4] Уразов Р.Р., Чиглинцев И.А., Насыров А.А. Образование склеротических отложений гидрата в трубе для отбора газа из купола-сепаратора // Инженерно-физический журнал. 2017. Т. 90, № 5. С. 1223–1231.  
DOI: [10.1007/s10891-017-1670-2](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1670-2)  
Urazov R.R., Chiglintsev I.A., Nasyrov A.A. Formation of Sclerotic Hydrate Deposits in a Pipe for Extraction of a Gas from a Dome Separator // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2017. Vol. 90, No. 5. Pp. 1162–1169.  
DOI: [10.1007/s10891-017-1670-2](https://doi.org/10.1007/s10891-017-1670-2)
- [5] Chiglintsev I.A., Nasyrov A.A. Modeling of the process of filling a dome separator with the decomposition of a gas hydrate formed during the mounting of the installation // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. 2016. V. 89, No. 4. Pp. 854–863.  
DOI: [10.1007/s10891-016-1446-0](https://doi.org/10.1007/s10891-016-1446-0)
- [6] Sammarco P.W., Kolian S.R., Warby R.A.F., Bouldin J.L., Subra W.A., Porter S.A., Distribution and concentrations of petroleum hydrocarbons associated with the BP/Deepwater Horizon Oil Spill, Gulf of Mexico // Marine Pollution Bulletin. 2013. V. 73, No. 1. Pp. 129–143.  
DOI: [10.1016/j.marpolbul.2013.05.029](https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.029)
- [7] Кильдибаева С.Р., Столповский М.В. Этапы накопления капель нефти и пузырьков газа в куполе для случаев глубоководных разливов: часть 1 // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. 2023. № 6. С. 57–75.  
Kildibaeva S.R., Stolpovsky M.V. Stages of Accumulation of Oil Droplets and Gas Bubbles in the Dome for Cases of Deep-Sea Spills: Part 1 // Oil and Gas Business. 2023. No. 6. Pp. 57–75. (in Russian)  
DOI: [10.17122/ogbus-2023-6-57-75](https://doi.org/10.17122/ogbus-2023-6-57-75)
- [8] Кильдибаева С.Р., Гималтдинов И.К. Динамика многофазной затопленной струи с учетом образования гидратов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2015. Т. 1, № 3. С. 92–101.  
Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K. Dynamics of multiphase flooded jet with consideration of hydrate formation // Bulletin of Tyumen State University. Physico-mathematical modelling. Oil, gas, energy. 2015. Vol. 1, No. 3. Pp. 92–101 (In Russian).  
EDN: [vvrhzn](https://www.edn.ru/vvrhzn)
- [9] Kildibaeva S.R., Gimaltdinov I.K., Kharisov E.I. Conduction of a Laboratory Experiment with the Goal of Researching Submerged Flow Peculiarities // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. V. 988. Pp. 042049.  
DOI: [10.1088/1755-1315/988/4/042049](https://doi.org/10.1088/1755-1315/988/4/042049)
- [10] Кильдибаева С.Р., Харисов Э.И. Трехмерная визуализация модели течения многофазной затопленной струи // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. 2023. Т. 16, № 1. С. 69–80.  
Kildibaeva S.R., Kharisov E.I. Three-Dimensional visualization of the submerged jet flow model // Bulletin of the South Ural State University, Series: Mathematical Modelling, Programming and Computer Software. 2023. Vol. 16. No. 1. Pp. 69–80. (in Russian)  
DOI: [10.14529/mmp230106](https://doi.org/10.14529/mmp230106)
- [11] Daskiran C., Cui F., Boufadel M.C., Zhao L., Socolofsky S.A., Ozgokmen T. Hydrodynamics and dilution of an oil jet in crossflow: The role of small-scale motions from laboratory experiment and large eddy simulations // International Journal of Heat and Fluid Flow. 2020. V. 85. P. 108634.  
DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108634](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2020.108634)
- [12] Lee J.H.W., Chu V.H. Turbulent jets and plumes – a Lagrangian approach. Kluwer, 2003. 390 p.
- [13] Yapa P.D., Dasanayaka L.K., Bandara U.C., Nakata K. A model to simulate the transport and fate of gas and hydrates released in deepwater // Journal of Hydraulic Research. 2010. V. 48(5). Pp. 559–572.  
DOI: [10.1080/00221686.2010.507010](https://doi.org/10.1080/00221686.2010.507010)
- [14] 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. V. 41, No. 4. Pp. 339–351.  
DOI: [10.1080/00221680309499980](https://doi.org/10.1080/00221680309499980)
- [15] Yapa P.D., Li Z. Simulation of oil spills from underwater accidents I: Model development // Journal of Hydraulic Research. 1997. V. 5(5). Pp. 673–688.  
DOI: [10.1080/00221689709498401](https://doi.org/10.1080/00221689709498401)
- [16] Chen F., Yapa P.D. Modeling gas separation from a bent deepwater oil and gas jet/plume // Journal of Marine Systems. 2004. No. 45. Pp. 189–203.  
DOI: [10.1016/j.jmarsys.2003.11.005](https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.11.005)

## Сведения об авторах / Information about the Authors

### Светлана Рустамовна Кильдибаева

канд. физ.-мат. наук, доцент  
Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак, Россия

### Эмиль Ирекович Харисов

Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак, Россия

### Svetlana Rustamovna Kildibaeva

Ph.D. (Phys. & Math.), Assist. Prof.  
Sterlitamak branch of Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak, Russia  
[freya.13@mail.ru](mailto:freya.13@mail.ru)  
ORCID: [0000-0001-9586-8926](https://orcid.org/0000-0001-9586-8926)

### Emil Irekovich Kharisov

Sterlitamak branch of Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak, Russia  
[e.i.harisov@strbsu.ru](mailto:e.i.harisov@strbsu.ru)

**Элина Эдуардовна Суяргулова**

Стерлитамакский филиал Уфимского университета науки и технологий, Стерлитамак, Россия

**Elina Eduardovna Suyargulova**

Sterlitamak branch of Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak, Russia  
[17elinushka17@gmail.com](mailto:17elinushka17@gmail.com)