

Нефтегазовое дело. 2023. № 2. С. 19–35. ISSN 1813-503X (online)  
Oil and Gas Business. 2023. No. 2, P. 19–35. ISSN 1813-503X (online)

Научная статья

УДК 532.546:536.421

doi <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-2-19-35>

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ВОВЛЕЧЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ ВОДЫ В СТРУЮ ДЛЯ ЗАДАЧИ О ТЕХНОГЕННЫХ РАЗЛИВАХ НЕФТИ**

**Светлана Рустамовна Кильдибаева<sup>1</sup>,**

**Максим Владимирович Столповский<sup>2</sup>, Элина Эдуардовна Суяргулова<sup>1</sup>**

**<sup>1</sup>Уфимский университет науки и технологий,**

**Стерлитамакский филиал, Стерлитамак, Россия**

**<sup>2</sup>Уфимский государственный нефтяной технический университет,**

**Уфа, Россия**

**Автор, ответственный за переписку:**

**Максим Владимирович Столповский, [s\\_maxim.pmm@mail.ru](mailto:s_maxim.pmm@mail.ru)**

**Аннотация.** Ежегодно масштабы разработки нефтяных недр на территории Российской Федерации растут. Треть добываемых углеводородов приходится на морскую зону. В России морская нефтедобыча проходит в Охотском, Балтийском, Каспийском и Печорском морях. Нефтедобыча в шлейфе является технологически сложным процессом, тем самым растет актуальность создания безопасных процессов добычи, транспортировки и переработки нефтепродуктов.

В случае пренебрежения техникой безопасности, игнорирования ежегодных диагностических и ремонтных работ могут возникнуть факторы, провоцирующие возникновение техногенных аварий, приводящих к природным катастрофам. Последствия аварийных нефтяных разливов приводят к уничтожению флоры и фауны в

окружающей среде. Для полной ликвидации нефтеразлива требуются немалые экономические, технологические и временные ресурсы.

Морской нефтеразлив ведет к образованию затопленных струй, распространяющих углеводороды в окружающую среду. Прогнозируя поведение данной затопленной струи, возможно ускорение процесса ликвидации аварийного разлива нефти.

В работе рассмотрена задача образования поврежденного источника нефтепродуктов. Данный источник течения нефти мог быть образован вследствие повреждения нефтепровода. По условию задачи данный источник расположен на дне водоема и имеет следующие теплофизические характеристики: объемный расход нефти, температуру, плотность и т.д. В задаче рассматриваются характеристики среды, отличающиеся небольшой глубиной пролегания нефтепровода, поэтому образование гидрата не учитывается.

Для решения задачи используется интегральный лагранжевый метод контрольных объемов. Согласно этому методу, затопленная струя рассматривается как последовательность цилиндрических контрольных объемов, обладающих собственными характеристиками, такими как радиус, высота, плотность, коэффициент содержания нефти, температура, скорость и т.д. В зависимости от перемещения контрольного объема пересчитываются вышеуказанные параметры. На данную затопленную струю влияют также характеристики окружающей среды: температура и соленость воды, наличие подводного течения.

В результате была построена математическая модель, содержащая в себе основные уравнения, описывающие процессы течения нефти с учётом вовлечения. Для точности модели подробно рассматривается уточненный параметр вовлечения окружающей жидкости в струю. На основе математической модели были проведены вычисления для различных форматов вовлечения воды в струю для случаев нефтяных разливов. Для выявления зависимостей теплофизических характеристик были построены графики.

**Ключевые слова:** шельф, разлив нефти, загрязнение водоема, разрыв трубопровода, гидратообразование

**Для цитирования:** Кильдибаева С. Р., Столповский М. В., Суяргулова Э. Э. Об особенностях вовлечения окружающей воды в струю для задачи о техногенных разливах нефти // Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2023. № 2. С. 19–35. <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-2-19-35>.

Original article

## ABOUT THE FEATURES OF SURROUNDING WATER INVOLVEMENT IN THE JET FOR THE PROBLEM ON MAN-MADE OIL SPILLS

Svetlana R. Kildibaeva<sup>1</sup>, Maxim V. Stolpovsky<sup>2</sup>, Elina E. Suyargulova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ufa University of Science and Technology, Sterlitamak Branch,  
Sterlitamak, Russia

<sup>2</sup>Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

### Corresponding author:

Maxim V. Stolpovsky, s\_maxim.pmm@mail.ru

**Abstract.** Every year, the scale of oil development in the Russian Federation is growing. A third of the hydrocarbons produced are in the offshore zone. In Russia, offshore oil production takes place in the Okhotsk, Baltic, Caspian and Pechora Seas. Oil production in a pipeline is a technologically complex process, thereby increasing the relevance of creating safe processes for the production, transportation and processing of petroleum products.

If safety precautions are neglected, annual diagnostic and repair work is ignored, factors may arise that provoke the occurrence of man-made accidents leading to natural disasters. The consequences of accidental oil spills lead to the destruction of flora and fauna in the environment. For the complete elimination of an oil spill, considerable economic, technological and time resources are required.

An offshore oil spill results in the formation of submerged jets that spread hydrocarbons into the surrounding fluid. Predicting the behavior of this submerged jet, it is possible to accelerate the process of oil spill response.

The paper considers the problem of formation of a damaged source of oil products. This source could be formed as a result of oil pipeline damage. According to the condition of the problem, this source is located at the bottom of the reservoir and has the following

thermophysical characteristics: oil volume flow, temperature, density, etc. The problem considers the characteristics of the medium, which are characterized by a small depth of the oil pipeline, so the formation of hydrate is not taken into account.

To solve the problem, the integral Lagrangian control volumes method (ILCVM) is used. According to this method, the submerged jet is considered as a sequence of cylindrical control volumes, which have their own characteristics, such as radius, height, density, liquid content ratio, temperature, velocity, etc. Depending on the movement of the control volume, the above parameters are recalculated. This submerged jet is also affected by the characteristics of the environment: liquid temperature, water salinity, and the presence of an undercurrent.

As a result of using ILCVM, a mathematical model that contains the equations of conservation of momentum, mass and energy was built. For the accuracy of the model, the parameter of the involvement of the surrounding fluid in the jet is considered in detail. Based on the mathematical model, calculations were carried out for various formats of water entrainment in the jet for cases of oil spills. Graphs were constructed to identify the dependencies of the thermophysical characteristics.

**Keywords:** shelf, oil spill, reservoir pollution, pipeline rupture, hydrate formation

**For citation:** Kil'dibaeva S. R., Stolpovskii M. V., Suyargulova E. E. Ob osobennostyakh vovlecheniya okruzhayushchei vody v struyu dlya zadachi o tekhnogennykh razlivakh nefiti [About the Features of Surrounding Water Involvement in the Jet for the Problem on Man-Made Oil Spills]. *Setevoe izdanie «Neftegazovoe delo» – Network Journal «Oil and Gas Business»*, 2023, No. 2, pp. 19–35 [in Russian]. <https://dx.doi.org/10.17122/ogbus-2023-2-19-35>.

## Введение

Нефтепромышленность в России является ведущей отраслью российской экономики, включая в себя добычу, транспортировку, переработку и реализацию нефтепродуктов. В 2022 году на территории России зарегистрировано 88 нефтеперерабатывающих заводов, 37 из которых введены в эксплуатацию, 7 находятся в процессе строительства, 42

завода на стадии проектировки. За первое полугодие 2022 года увеличились показатели добычи нефти относительно аналогичного периода 2021 года.

В рамках мировой добычи нефти треть добываемых углеводородов приходится на морскую зону. В России морская нефтедобыча проходит в Охотском, Балтийском, Каспийском и Печорском морях. 75 % нефти, добываемой в шлейфе, приходится на проекты «Сахалин-1» и «Сахалин- 2» [1].

В связи с технологически сложными процессами добычи и транспортировки нефти из морских недр могут возникнуть факторы, провоцирующие аварийные нефтеразливы [2]. Факторы могут быть образованы вследствие игнорирования периодического технического освидетельствования, а также диагностических и ремонтных работ, пренебрежения техникой безопасности и ошибок при проектировании.

Экономические потери, загрязнение окружающей среды, приводящие к уничтожению флоры и фауны, являются последствиями аварийного разлива нефти. Существуют различные методы ликвидации аварийного разлива нефти (ЛАРН): механические, физико-химические и биологические. В зависимости от типа нефтеразлива используются соответствующие методы ЛАРН.

Морской нефтеразлив сопровождается образованием затопленных струй, распространяющих углеводороды в окружающую среду [3–5]. Прогнозирование поведения затопленной струи позволит ускорить процесс ЛАРН.

В работе рассмотрена задача течения нефти из поврежденного источника, расположенного на дне водоема. Данный источник мог быть образован путем повреждения нефтепровода. Начальными условиями выступают теплофизические параметры нефти и окружающей жидкости. Математическая модель, состоящая из дифференциальных уравнений сохранения масс, импульсов и энергии, строится на основе интегрального

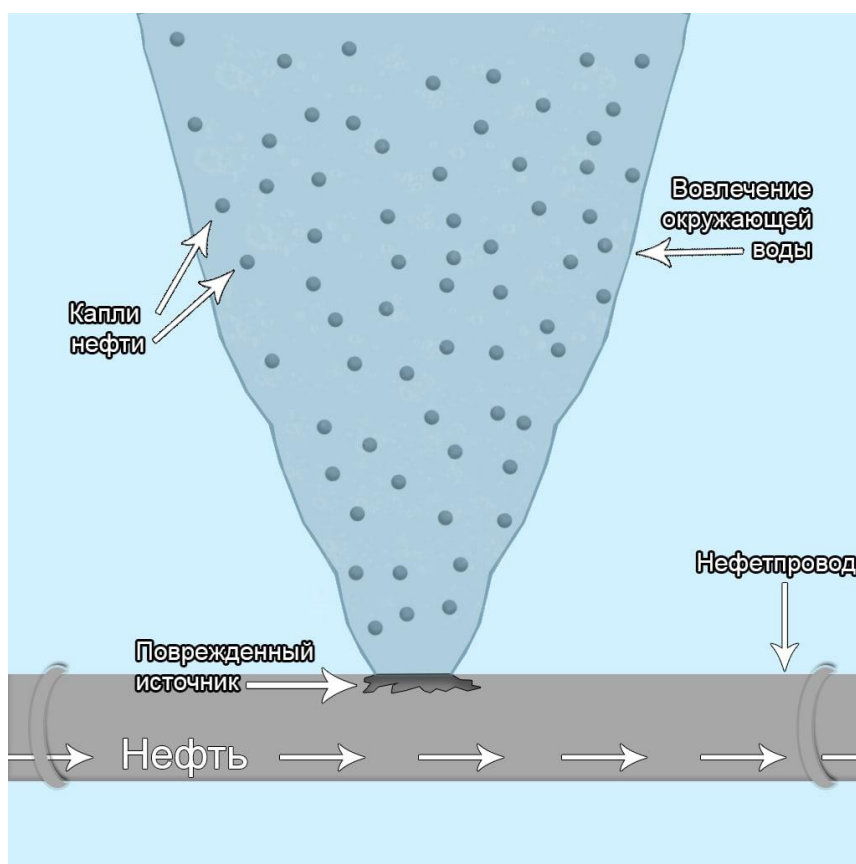
лагранжевого метода контрольных объемов (ИЛМКО), рассматривающего затопленную струю как последовательность цилиндрических контрольных объемов (КО), обладающих следующими параметрами: высотой, радиусом, скоростью, температурой, коэффициентом содержания жидкости и нефти и т.д. В зависимости от положения цилиндра относительно вертикальной координаты  $z$  пересчитывается значение собственных параметров КО. Так как источник расположен на небольшой глубине, то процесс образования гидрата не учитывается.

На основе вышеописанной математической модели были проведены вычислительные эксперименты, на основе которых были построены графики для исследования процесса вовлечения окружающей воды и его влияния на основные характеристики затопленной струи.

### **Постановка задачи**

В работе рассмотрим случай аварийного течения нефти, возникшего при морской транспортировке нефти через трубопровод (рисунок 1). Согласно постановке задачи, считаем, что на дне водоема располагается некоторый источник, из которого поступает нефть с известным объемным расходом, температурой и другими теплофизическими характеристиками, являющимися ключевыми при моделировании. В качестве такого источника может быть рассмотрен поврежденный трубопровод, который потерял герметичность. В более общем случае в качестве источника также может быть рассмотрена поврежденная скважина. Согласно постановке задачи, будем рассматривать такие теплофизические характеристики среды, которые отличаются небольшой глубиной пролегания трубопровода. Считаем, что объемный расход сопутствующего газа ничтожно мал, поэтому пренебрегаем его наличием в модели. Вследствие того, что глубина пролегания трубопровода также незначительна и не соответствует условиям стабильного существования гидрата, фазовые превращения газа в гидратное состояние также не

учитываются [3]. Считаем, что известны характеристики окружающей среды – воды, в которой происходит течение нефти. Ключевым фактором, который должен быть учтен в моделировании процесса, будет являться поле скоростей течения воды, из-за которого могут происходить снос нефти, более интенсивное смешивание воды и капель нефти, увеличение нефтяного пятна и его снос.



**Рисунок 1.** Схема аварийного разлива нефти при транспортировке через нефтепровод

**Figure 1.** Scheme of an emergency oil spill during transportation through an oil pipeline

Для моделирования течения капель нефти, поступающих из источника, будем использовать интегральный лагранжевый метод контрольного

объема (ИЛМКО) [3–5]. Согласно этому методу, зная ключевые характеристики параметров течения нефти в начальный момент времени и характеристики окружающей среды, можно получить изменение основных зависимостей по вертикальной координате. Таким образом, можно определить динамику течения капель нефти. Суть метода заключается в моделировании цилиндрических контрольных объемов и рассмотрении их перемещения в трехмерной системе координат с течением времени (рисунок 1). Более подробно о методике расчета написано в работе [3].

### Основные уравнения

Рассмотрим основную систему дифференциальных уравнений, описывающую течение капель нефти в рамках поставленной задачи. Для простоты введем следующие обозначения:

$r$  – радиус источника в поврежденном трубопроводе;

$Q_o^e$  – объемный расход выливающейся из трубопровода нефти;

$T^e$  и  $T_w$  – начальные температуры нефти и воды;

$V_w$  – скорость окружающей воды;

$z$  – глубина пролегания трубопровода.

$$\frac{dM_w}{dt} = \rho_w Q_w, \quad \frac{dM_o}{dt} = 0,$$

$$\frac{d}{dt}(Mu) = u_w \rho_w Q_w,$$

$$\frac{d}{dt}(Mv) = v_w \rho_w Q_w,$$

$$\frac{d}{dt}[(M_w + M_o)w] = w_w \rho_w Q_w + (\rho_w - \rho_l) \pi b^2 h (\alpha_w + \alpha_o) g,$$

$$\frac{d}{dt}(cMT) = c_w T_w \rho_w Q_w, \quad c = \sum \chi_i c_i, \quad c = \chi_o c_o + \chi_g c_g + \chi_h c_h + \chi_w c_w$$

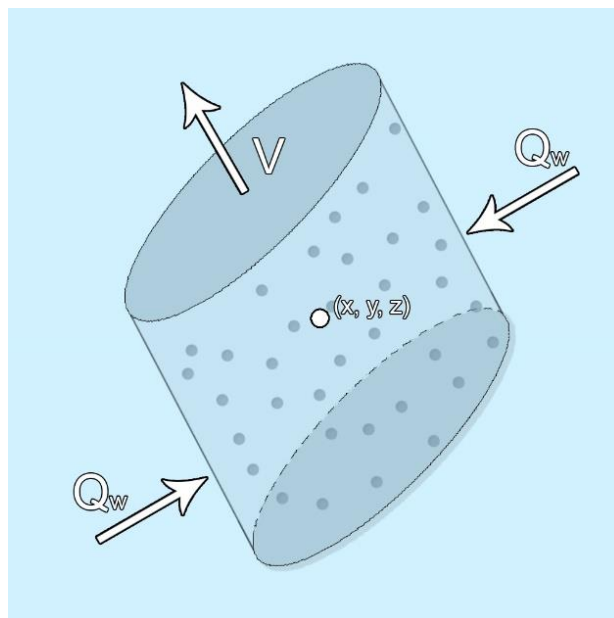
$$\vec{V} = u\vec{i} + v\vec{j} + w\vec{k}, \quad \vec{V}_w = u_w\vec{i} + v_w\vec{j} + w_w\vec{k}, \quad \rho_l = \alpha_w \rho_w + \alpha_o \rho_o,$$

где  $M_i$ ,  $\rho_i$ ,  $c_i$ ,  $\alpha_i$  ( $i = o, w$ ) – масса, плотность, теплоемкость, объемное содержание нефти и воды;



$Q_w$  – объемный расход вовлеченной в струю окружающей воды;

$V$  – скорость струи.



**Рисунок 2.** Схема вовлечения воды в контрольный объем

**Figure 2.** Scheme of water involvement in the control volume

На рисунке 2 приведена схема, на которой показан процесс вовлечения окружающей воды в контрольный объем. Отметим, что в начальный момент времени в контрольном объеме находятся только капли нефти, поступающие из поврежденного трубопровода. Ключевой особенностью рассматриваемого течения является процесс перемешивания капель с окружающей средой, в качестве которой рассматривается вода. Это влияет на динамику распространения нефтяных капель, а также основные характеристики: температуру, скорость и т.д. Ниже приводится уравнение, которое описывает процесс вовлечения окружающей воды в контрольный объем и определяет динамику изменения объемных содержаний компонент в контрольном объеме:

$$Q_s = 2\pi b h \alpha |\vec{V}|.$$

Ключевыми характеристиками в этом уравнении являются скорость течения  $\vec{V}$  и коэффициент вовлечения  $\alpha$ , который может быть определен следующим образом:

$$\alpha = \sqrt{2} \left( 0.057 + \frac{0.554 \sin \varphi}{E^2 Fr^2} \right),$$

где – число Фруда,  $Fr = |\vec{V}| \left( g \frac{\Delta \rho}{\rho_a} b \right)^{-1/2}$ , которое определяет отношение инерции потока к внешнему полю.

Помимо объемного расхода  $Q_s$ , отражающего вовлечение на основе динамики перемещения КО, также существует объемный расход  $Q_f$ , отражающий вовлечение воды за счет не идеальности формы контрольного объема, схема представлена на рисунке 3. Рисунок 3, *a* соответствует случаю, когда контрольный объем вычисляется без корректировки формы; рисунки 3, *a*, *b*, *c* соответствуют объемному вовлечению с учётом корректировки формы контрольного объема. Объемный расход с учётом не идеальности формы КО определяется следующим образом:

$$Q_f = \sqrt{Q_{fx}^2 + Q_{fy}^2 + Q_{fz}^2},$$

$$Q_{fx} = |U_w| \left[ \pi b \Delta b |\cos \varphi \cos \theta| + 2b \Delta s \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \cos^2 \theta} + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\cos \varphi \cos \theta)| \right],$$

$$Q_{fy} = |V_w| \left[ \pi b \Delta b |\cos \varphi \sin \theta| + 2b \Delta s \sqrt{1 - \cos^2 \varphi \sin^2 \theta} + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\cos \varphi \sin \theta)| \right],$$

$$Q_{fz} = |W_w| \left[ \pi b \Delta b |\sin \varphi| + 2b \Delta s (\cos \varphi) + \frac{\pi b^2}{2} |\Delta (\sin \varphi)| \right],$$

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2},$$

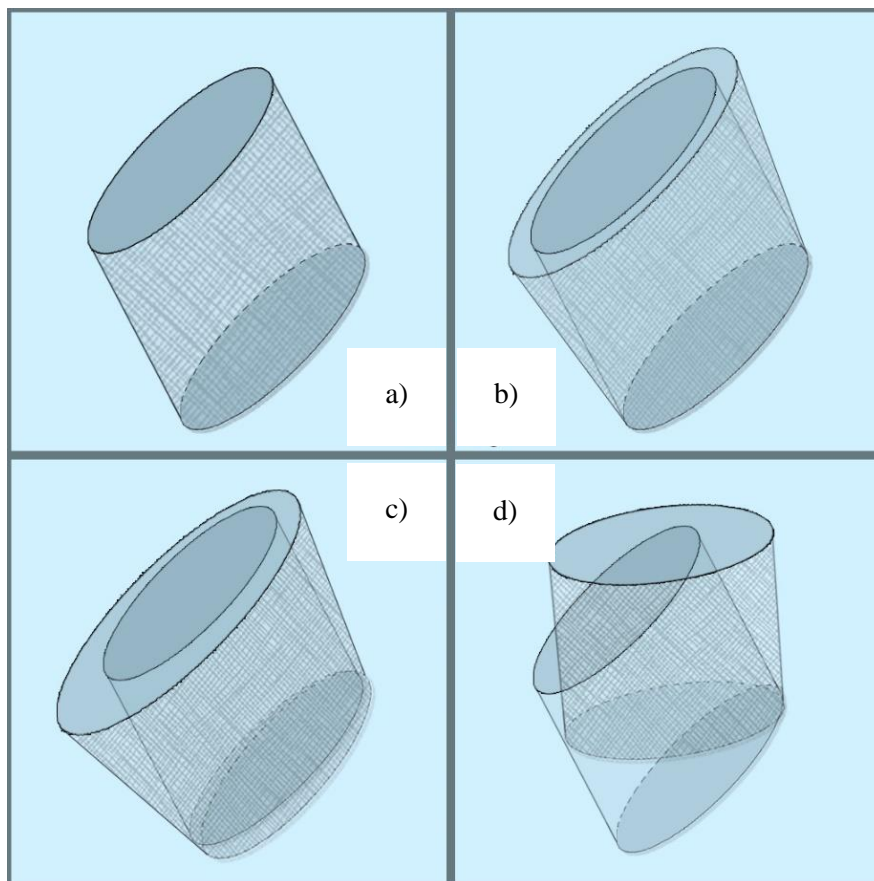
здесь  $Q_{fx}$ ,  $Q_{fy}$ ,  $Q_{fz}$  – изменение вовлечения по соответствующим координатам.

Полное вовлечение воды в контрольный объем будет вычисляться следующим образом:

$$Q_w = Q_s + Q_f .$$

Координаты движения контрольного объема определяются следующим образом:

$$\frac{dz}{dt} = w, \quad \frac{dx}{dt} = u, \quad \frac{dy}{dt} = v .$$



**Рисунок 3.** Корректировка процесса вовлечения в струю за счёт изменения формы контрольного объема

**Figure 3.** Correction of the process of entrainment in the jet by changing the shape of the control volume

Далее рассмотренные выше уравнения решаются численно для определения основных характеристик затопленной струи.

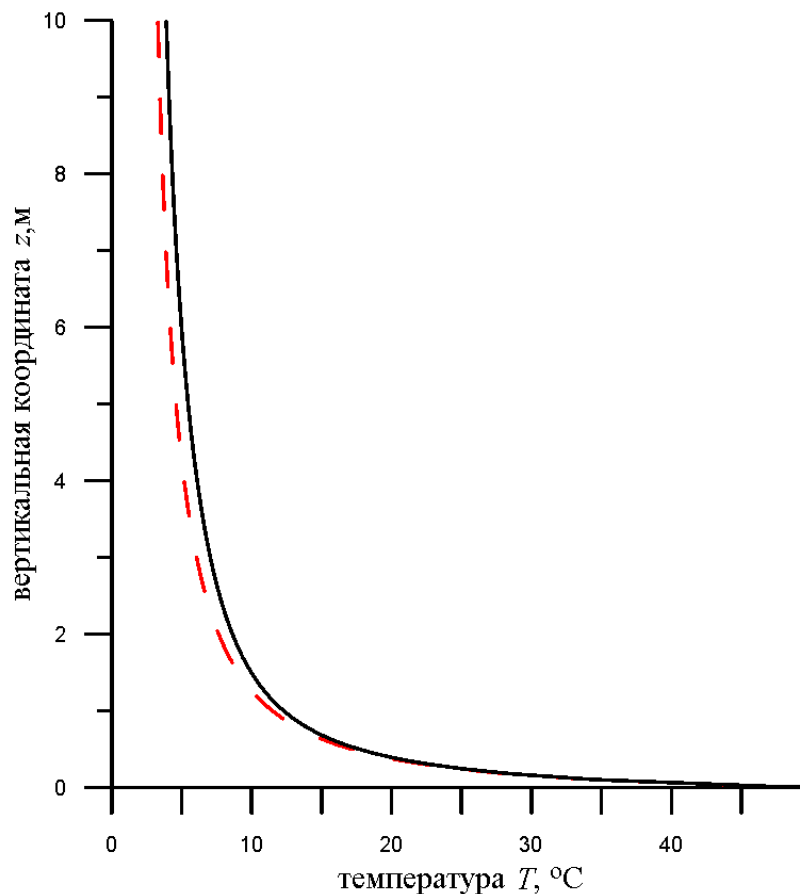
### Результаты расчетов

Результаты расчетов приведены для различных случаев начальных значений системы и окружающей среды: радиус источника  $r = 0,05$  м, начальная температура углеводородов на источнике  $T^e = 50$  °С, начальный объемный расход нефти  $Q_o^e = 0,1$  м<sup>3</sup>/с, скорость воды 1 м/с, плотности нефти и воды  $\rho_o = 650$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_w = 1030$  кг/м<sup>3</sup>. Глубина нахождения источника разлива составляет 100 м, температура окружающей среды 2 °С.

Рассмотрим процесс вовлечения нефти в струю для различных случаев. Отметим, что в рамках работы был проведен анализ, как наличие уточняющего коэффициента для формы контрольного объема оказывает влияние на характеристики течения. Согласно расчетам, было установлено, что уточнение формы контрольного объема (идеальная или уточненная) не оказывает существенного влияния на характеристики течения. Так, сравнение показало, что разница температур не превышает  $\Delta T = 0,02$  °С, разница скоростей струи не превышает 0,009 м/с.

На рисунке 4 представлены зависимости температуры струи для двух случаев: в 1 случае на струю действует только течение окружающей воды по 1 координате ( $u_w = 1, v_w = 0, w_w = 0$ ), во втором случае течение окружающей воды действует по двум координатам ( $u_w = 1, v_w = 1, w_w = 1$ ). Максимальная разница температур для расчетного случая составляет  $\Delta T = 1,5$  °С. Полученная разница температур для двух расчетных случаев связана с разницей модуля скорости течения окружающей среды в 3 раза. Скорость течения окружающей среды оказывает влияние на процесс вовлечения воды

в струю, объем вовлеченной воды увеличивается под ее действием, и, как следствие, температура струи падает быстрее.



случай 1 – сплошная кривая, скорость течения  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 0$  м/с,  $w_w = 0$  м/с ;

случай 2 – пунктирная кривая, скорость течения  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 1$  м/с,  $w_w = 1$  м/с

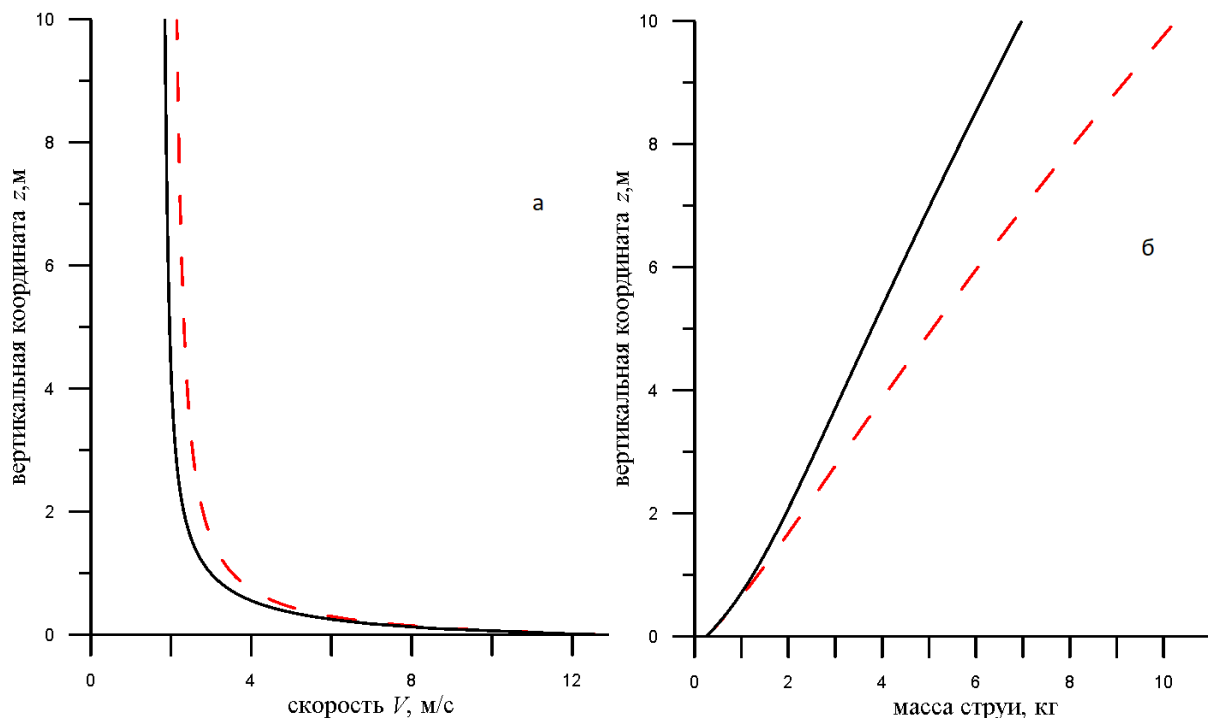
case 1 – solid curve, flow velocity  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 0$  м/с,  $w_w = 0$  м/с ;

case 2 – dotted curve, flow velocity  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 1$  м/с,  $w_w = 1$  м/с

**Рисунок 4.** Зависимость температуры струи нефти для случаев течения струи при действии подводного течения с разными начальными значениями

**Figure 4.** Dependence of the temperature of the oil jet for cases of jet flow under the action of an underwater current with different initial values

Рассмотрим зависимость скорости струи от вертикальной координаты для описанного выше случая (рисунок 5, а). Видим, что скорость струи быстрее в первом случае. Такой эффект связан с процессами вовлечения и большим значением модуля скорости окружающей воды для второго случая. Масса струи (рисунок 5, б) растет медленнее для первого случая, так как процессы вовлечения в этом случае происходят менее интенсивно.



случай 1 – сплошная кривая, скорость течения  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 0$  м/с,  $w_w = 0$  м/с ;

случай 2 – пунктирная кривая, скорость течения  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 1$  м/с,  $w_w = 1$  м/с

case 1 - solid curve, flow velocity  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 0$  м/с,  $w_w = 0$  м/с ;

case 2 - dotted curve, flow velocity  $u_w = 1$  м/с,  $v_w = 1$  м/с,  $w_w = 1$  м/с

**Рисунок 5.** Зависимости скорости струи нефти (а) и массы струи (б) для случаев течения струи при действии подводного течения с разными начальными значениями

**Figure 5.** Dependences of oil jet velocity (a) and jet mass (b) for cases of jet flow under the action of an undercurrent with different initial values

## Выводы

В статье приведена математическая модель течения нефти из поврежденного источника, расположенного на дне водоема. В работе рассмотрены процесс вовлечения окружающей воды и его влияние на основные характеристики затопленной струи. Подробно рассмотрена концепция влияния вовлечения окружающей воды в струю согласно постановке методике расчета интегрального лагранжевого метода контрольного объема, подробно рассмотрен случай корректировки формы контрольного объема. На основе вышеописанной математической модели были проведены вычислительные эксперименты для установления влияния процессов вовлечения на динамику течения нефти. Было установлено, что уточнение формы контрольного объема не оказывает существенного влияния на характеристики течения. Для рассмотренного расчетного случая, согласно расчетам, разница температур не превышает  $\Delta T = 0,02$  °С, разница скоростей не превышает 0,009 м/с.

## Список источников

1. Картамышева Е.С., Иванченко Д.С. Морская добыча нефти // Молодой ученый. 2017. № 25 (159). С. 107-110. URL: <https://moluch.ru/archive/159/44708/> (дата обращения: 01.03.2023). EDN: YUHWIX.
2. Крупнейшие разливы нефти в истории // Neftegaz.Ru. 29.06.2010. URL: <https://neftegaz.ru/analysis/ecology/329375-krupneyshie-razlivy-nefti-v-istorii-chelovechestva/> (дата обращения: 25.02.2023).
3. Гималтдинов И.К., Кильдибаева С.Р. Модель затопленной струи с учетом двух предельных схем гидратообразования // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1. С. 79-88. EDN: YPLOYC.
4. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of Oil Spills from Underwater Accidents I: Model Development // Journal of Hydraulic Research. 1997. Vol. 35, Issue 5. P. 673-688. DOI: 10.1080/00221689709498401.

5. Yapa P.D. Final Report Submitted to The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills. 2003. P. 1- 18.

## References

1. Kartamysheva E.S., Ivanchenko D.S. Morskaya dobycha nefti [Offshore Oil Production]. *Molodoi uchenyi – Young Scientist*, 2017, No. 25 (159), pp. 107-110. Available at: <https://moluch.ru/archive/159/44708/> (accessed 01.03.2023). EDN: YUHWIX. [in Russian].

2. Krupneishie razlivy nefti v istorii [The Biggest Oil Spills in History]. *Neftegaz.Ru*. 29.06.2010. Available at: <https://neftegaz.ru/analysis/ecology/329375-krupneyshie-razlivy-nefti-v-istorii-chelovechestva/> (accessed 25.02.2023). [in Russian].

3. Gimaltdinov I.K., Kildibaeva S.R. Model' zatoplennoi strui s uchetom dvukh predel'nykh skhem gidratoobrazovaniya [Model of a Submerged Jet Accounting for Two Limiting Schemes of Hydrate Formation]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2018, Vol. 25, No. 1, pp. 79-88. EDN: YPLOYC. [in Russian].

4. Yapa P.D., Zheng L. Simulation of Oil Spills from Underwater Accidents I: Model Development. *Journal of Hydraulic Research*, 1997, Vol. 35, Issue 5, pp. 673-688. DOI: 10.1080/00221689709498401.

5. Yapa P.D. Final Report Submitted to The Cooperative Institute for Coastal and Estuarine Environmental Technology (CICEET) Project Title: A Module for NOAA's GNOME Model to Provide Capability to Simulate Deepwater Oil and Gas Spills. 2003. P.1- 18.

## Информация об авторах

### Information about the authors

**Кильдибаева Светлана Рустамовна**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и программирования, научный сотрудник Научно-инновационного управления, Уфимский университет науки и технологий, Стерлитамакский филиал, Стерлитамак, Россия



**Svetlana R. Kildibaeva**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Informatics and Programming Department, Researcher of Scientific and Innovation Direction, Ufa University of Science and Technology, Branch in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia

freya.13@mail.ru

**Столповский Максим Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики, Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Россия

**Maxim V. Stolpovsky**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Assistant Professor of Physics Department, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russia

s\_maxim.pmm@mail.ru

**Суяргулова Элина Эдуардовна**, магистрант кафедры прикладной информатики и программирования, Уфимский университет науки и технологий, Стерлитамакский филиал, Стерлитамак, Россия

**Elina E. Suyargulova**, Undergraduate Student of Applied Informatics and Programming Department, Ufa University of Science and Technology, Branch in Sterlitamak, Sterlitamak, Russia

cosvkvx@gmail.com

*Статья поступила в редакцию 22.12.2022; одобрена после рецензирования 20.01.2023; принята к публикации 15.03.2023.*

*The article was submitted 22.12.2022; approved after reviewing 20.01.2023; accepted for publication 15.03.2023.*