



ISSN 2071-2898 (Print)
ISSN 2071-2901 (Online)

Чжан Ч., Меньшов И.С.

Численное моделирование
истечения природного газа
из подводного газопровода

Рекомендуемая форма библиографической ссылки: Чжан Ч., Меньшов И.С. Численное моделирование истечения природного газа из подводного газопровода // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2017. № 74. 18 с. doi:[10.20948/prepr-2017-74](https://doi.org/10.20948/prepr-2017-74)
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2017-74>

Ордена Ленина
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ
имени М.В.Келдыша
Российской академии наук

Ч. Чжан, И.С. Меньшов

**Численное моделирование
истечения природного газа
из подводного газопровода**

Москва — 2017

Чжан Ч., Меньшов И. С.

Численное моделирование истечения природного газа из подводного газопровода

В препринте рассматривается упрощенная модельная задача, соответствующая задаче истечения природного газа из подводного газопровода. В рамках одного уравнения состояния проведено моделирование истечения легкого газа (метана) в область более плотного газа (воды), граничащего по плоской поверхности с легким газом (воздухом). Задача рассматривается в двумерной постановке с учетом, соответственно, плоской и осевой симметрии. Дается анализ возникающего течения, особенностей выхода метана на поверхность воды, а также оценка расходных характеристик.

Ключевые слова: утечка природного газа, подводный газопровод, многокомпонентное течение

Chao Zhang, Igor Stanislavovich Menshov

Numerical Modeling of Nature Gas Leakage from Underwater Gas Pipeline

In the preprint we consider the simplified model problem of the release of the natural gas from the subsea pipeline. In the framework of a single equation of state, we perform mathematical modeling of a light gas (methane) outflow from a pipeline into the domain occupied by a heavier gas (water) that borders another light gas (air) along a plane. The problem is considered in the two-dimensional approximation that takes into account the plane and axial symmetries. The analysis of the flow appeared, and some peculiarities of the methane rising and entering the air are discussed; the estimation of the mass flow rate from the pipeline and methane releasing into air is given.

Key words: leakage of natural gas, underwater gas pipeline, stratified flow

Оглавление

Введение	3
Математическая постановка задачи	4
Результаты моделирования	8
Заключение.....	15
Библиографический список.....	17

Введение

Во многих странах добывается природный газ на континентальном шельфе. Количество и время эксплуатации подводных трубопроводов увеличивается с каждым годом в мире, в результате чего вероятность неисправности возрастает. При аварийной ситуации часто происходит утечка газа, что представляет угрозу для безопасности окружающей среды. Транспортируемый газ истекает из газопровода, выходит на поверхность воды и рассеивается в атмосфере (рис. 1). Для безопасной эксплуатации подводных газопроводов необходимо сделать оценку вероятности возникновения аварии. Оценка возможности пожара и взрыва требует знания распределения истекающего природного газа на поверхности воды и в атмосфере. Многочисленные аварии из-за утечки газа в последние годы подчёркивают актуальность исследований течения в воде и атмосфере, возникающего при истечении из подводного трубопровода газа и его выхода на поверхность воды. Одной из важных задач, связанных с эксплуатацией подводных газопроводов, является численное моделирование аварийных ситуаций при различных условиях.

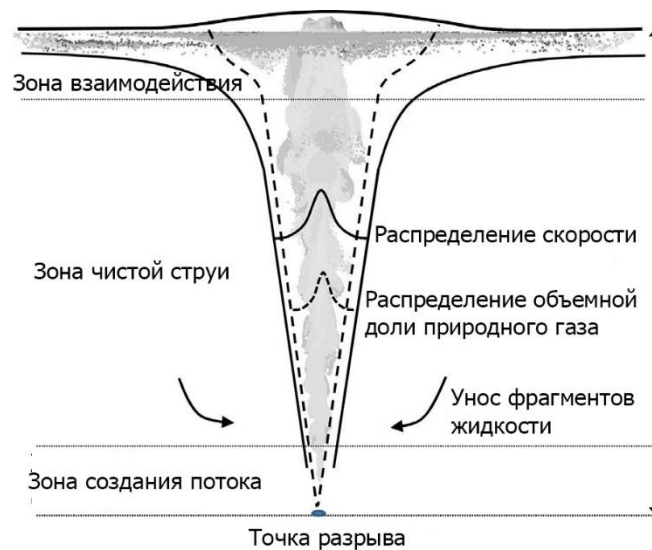


Рис. 1. Схема истечения природного газа из подводного газопровода.

Для описания сложного процесса истечения легкого газа из подводного трубопровода в работах [3,4] была предложена упрощенная интегральная модель. Недостатком этой интегральной модели являются сильная зависимость от эмпирических коэффициентов и невозможность описать процесс вблизи поверхности моря. По сравнению с интегральной моделью вычислительная модель на основе уравнений гидродинамики более точно описывает основные процессы. Она позволяет описать как многофазное течение в воде, так и взаимодействие истекающего газа с атмосферой на поверхности воды. В последние годы ученые в разных странах ведут активные исследования в этом

направлении [8, 9, 10].

Давление на глубине, где обычно проходит газопровод, настолько высоко, что свойства истекающего газа отклоняются от модели идеального газа. Для учета этой неидеальности нужно использовать более сложные уравнения состояния, учитывающие реальные свойства газа, например, уравнение Ван дер Ваальса. В данной работе мы рассматриваем предварительные результаты задачи истечения из подводного трубопровода, когда используется упрощенная математическая модель. В этой модели истекающий газ, вода и воздух моделируются некоторой эффективной сжимаемой средой с уравнением состояния в формате идеального газа.

Математические постановки задачи

Движение истекающего из трубопровода газа в воде можно разделить на три этапа: создание потока (или реактивная зона), струйное течение и взаимодействие течения метана с поверхностью воды (зона взаимодействия, рис. 1). Движение газа в зоне создания потока характеризуется большой скоростью и турбулентностью. Движение газа в этой зоне определяется большим начальным импульсом истекающего газа [1]. По мере продвижения к поверхности моря газ расширяется и формируется в пузырь. С одной стороны на пузырь газа действует тормозящая сила окружающей воды, с другой стороны газ передает свой импульс окружающей среде. Взаимодействие между газом и водой приводит к явлению уноса фрагментов жидкости [2].

В зоне чистой струи значение импульса газа мало. Сила Архимеда становится доминирующей движущей силой, под действием которой газ поднимается на поверхность. В этой зоне размеры пузырей зависят от параметров турбулентности.

Когда газ приближается к поверхности моря, капли воды вблизи межфазной границы расходятся в радиальном направлении горизонтальной поверхности унося за собой пузырьки газа. Выход газового пузыря на поверхность моря приводит к формированию фонтана в зоне взаимодействия [1]. Множество пузырьков выходят через поверхность в атмосферу, из-за чего на поверхности воды образуется зона кипения.

В данной работе рассматривается упрощенная задача, соответствующая задаче истечения газа из подводного газопровода. В рассматриваемой модели не учитываются следующие факторы: (1) растворение метана в воде, (2) гидратообразование, (3) подводное течение, (4) эффект турбулентности. В реальности, при большой глубине истечения газа, процесс всплывания метана к поверхности моря достаточно длительный и количество растворимого газа значительно [7]. При высоком давлении и низкой температуре происходит также гидратообразование в воде, природный газ превращается в гидраты сразу после того как он вытекает из газопровода [7]. При таких условиях природный газ не подчиняется уравнению состояния идеального газа. Океанское течение

оказывает влияние на характер формирования струи природного газа в воде. Кроме того, большая диссипация энергии за счет турбулентности наблюдается в развитом струйном течении при подходе к свободной поверхности [9]. Все эти эффекты мы постараемся учесть в наших последующих работах.

Рассматривается трехкомпонентная среда, состоящая из природного газа, воздуха и воды. Вместо природного газа мы использовали его основной компонент метан. Вместо воды, мы рассматривали сжимаемую среду, той же плотности, что и вода, но с уравнением состояния идеального газа. Таким образом, все три компонента в нашей модели будут представляться идеальным газом с эффективным показателем адиабаты. Турбулентность не учитывается в данной работе.

Мы рассматриваем задачу в двух постановках: (А) плоская симметрия и (Б) осевая симметрия.

Для плоской задачи (задача А) используется Декартова система координат. Определяющие уравнения имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_t + F(U)_x + G(U)_y &= S(U), \\
 U &= [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad E]^T, \\
 F &= [\rho u \quad \rho u^2 + p \quad \rho uv \quad u(E+p)]^T, \\
 G &= [\rho v \quad \rho vu \quad \rho v^2 + p \quad v(E+p)]^T, \\
 S &= [0 \quad 0 \quad -\rho g \quad -\rho gv]^T, \\
 E &= \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) + \rho e,
 \end{aligned} \tag{1}$$

где ρ – плотность, u – скорость по направлению координаты x , v – скорость по направлению координаты y , e – удельная внутренняя энергия, E – полная энергия на единицу объема, g – ускорение силы тяжести.

Для осесимметричной задачи (задача Б) используется цилиндрическая система координат. Определяющие уравнения для осесимметричной задачи имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 U_t + F(U)_r + G(U)_z &= S(U), \\
 U &= [r\rho \quad r\rho u_r \quad r\rho u_z \quad rE]^T, \\
 F &= [r\rho u_r \quad r(\rho u_r^2 + p) \quad r\rho u_r u_z \quad r(E+p)u_r]^T,
 \end{aligned} \tag{2}$$

$$G = [r\rho u_z \quad r\rho u_r u_z \quad r(\rho u_z^2 + p) \quad r(E + p)u_z]^T,$$

$$S = [0 \quad P \quad -\rho g \quad -\rho g u_r]^T,$$

$$E = \frac{1}{2} \rho (u_r^2 + u_z^2) + \rho e,$$

здесь u_r – радиальная компонента скорости, u_z – скорость вдоль оси симметрии.

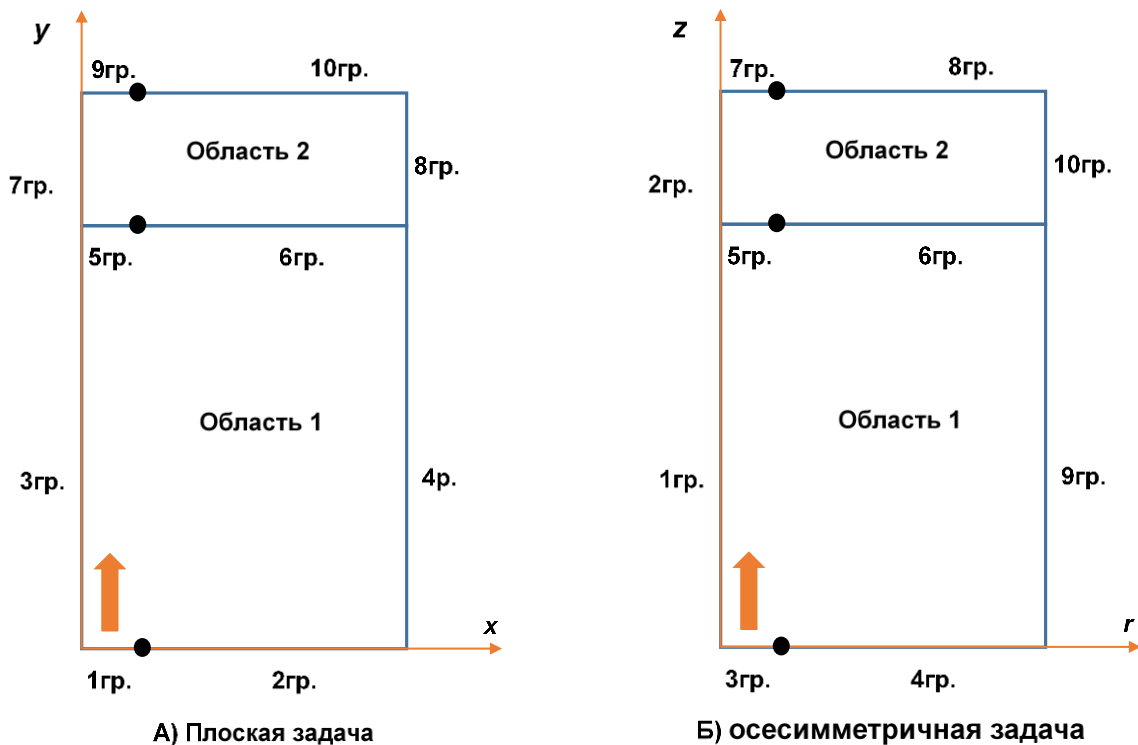


Рис. 2. Схема постановки задачи.

Схема задачи проведена на рис. 2. В качестве примера рассмотрим плоскую задачу. В области 1 и области 2 находятся вода и воздух, соответственно. Природный газ истекает из газопровода через разрыв (1гр., 3гр.), где давление задается выше, чем в воде. Природный газ всплывает под действием выталкивающей силы. Задача заключается в том, чтобы определить распределение метана в воде и воздухе и оценить количество метана, вытекающего через поверхность.

При моделировании этого процесса используется метод конечного объема. Численный поток аппроксимируется по методу С. К. Годунова с использованием точного решения задачи Римана о распаде произвольного разрыва [10]. Сеточное восполнение решения реализовано в классе квадратичных функций с использованием интерполяционной схемы 3-его

порядка типа MUSCL [11,12] и корректирующим фактором для производных в форме Ван Албада [13].

Параметры расчета для рассматриваемых двух задач проведены в Таблице 1.

Индекс границы устанавливается целым числом, равным:

3 – для граничных условий типа стенка (нулевая скорость и нулевая производная от давления по нормальному к границе направлению);

4 – для граничных условий, задающих все параметры (плотность ρ , 2 компоненты вектора скорости v_x, v_y и давление p) на границе;

6 – для граничного условия типа «ось симметрии».

В нашем случае на границе типа 4 компоненты вектора скорости равны нулю. Для границ типа 3 и 6 не надо задавать параметры, поэтому соответствующие ячейки в таблице 1 остаются пустыми. На границах 2, 6, 10 в задаче (А) и 4, 6, 8 в задаче (Б) сетки сгущаются к началу подграницы. Длина минимального интервала 0,05м.

В области 1 находится воздух, силой тяжести которого пренебрегается. В этой области заданы такие же начальные данные, как граничные значения на границе 9 и 10 в задаче (А) и 7 и 8 в задаче (Б).

Сила тяжести создает в воде (область 2) неравномерные по высоте распределения плотности и давления. Эти распределения можно получить аналитически на основе решения гидростатической задачи.

Таблица 1

Параметры границ

Номер границ		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А	тип	4	3	3	3	2	2	3	3	4	4
	длина, м	1	39	80	80	1	39	20	20	1	39
	сетка	20	80	200	200	20	80	50	50	20	80
	условия	$\rho, \text{кг/м}^3$	77.14								1.29
$p, \text{Па}$		10^7								10^5	10^5
Б	тип	6	6	4	3	2	2	4	4	3	3
	длина, м	80	20	1	39	1	39	1	39	80	20
	сетка	200	50	20	80	20	80	20	80	200	50
	условия	$\rho, \text{кг/м}^3$			77.14				1.29	1.29	
$p, \text{Па}$				10^7				10^5	10^5		

В области 2 распределение давления $P(y)$ в задаче А определяется:

$$\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} = -g, \quad (3)$$

где ρ – плотность воды, $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$; p – давление, Па; y – координата по вертикальному направлению, м; g – ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$.

Мы также предполагаем изэнтропичность по высоте:

$$\frac{P}{\rho^\gamma} = \frac{P_0}{\rho_0^\gamma} = S, \quad (4)$$

где γ – показатель адиабаты; S – функция энтропии; ρ_0, p_0 – плотность воды и давление на свободной поверхности соответственно.

На поверхности моря имеем граничное условие:

$$y = 80\text{м}, \rho_0 = 1000\text{кг/м}^3, p_0 = 10^5 \text{Па}. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (3) и (4) дает следующие соотношения:

$$C - y = \frac{S}{g} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \rho^{\gamma-1} = B \rho^{\gamma-1}, \quad (6)$$

$$B = \frac{S}{g} \frac{\gamma}{\gamma - 1}, \quad (7)$$

где B, C – констант.

Используем граничное условие (5), получим $S= 6.31, B=2.25, C= 115.71$.

В результате получаем искомые распределения, задающие плотность и давление воды в зависимости от глубины:

$$\rho = \left(\frac{C - y}{B} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}}, \quad (8)$$

$$p = S \left(\frac{C - y}{B} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}. \quad (9)$$

Начальные данные в области 2 определяются по формуле (8) (9) в зависимости от y .

Результаты моделирования

В начальный момент времени давление на границе разрыва газопровода составляет 10 МПа, а вблизи границы находится вода под давлением 5.94МПа. Из-за разницы давления метан приобретает импульс в вертикальном направлении и начинает истекать из газопровода, вытесняя воду. Образуется типичное струйное течение, взаимодействующее с окружающей водой. В результате этого взаимодействия давление в воде возрастает, что приводит к уменьшению скорости струи. По мере истечения метана из газопровода, зону вблизи от границы разрыва занимает вытекший метан, и разница давления

уменьшается. Это приводит к уменьшению скорости вытекания метана из газопровода. На рис. 3 и 4 показаны распределения вертикальной скорости в разные моменты времени для задач А и Б, соответственно. Видно, что вертикальная скорость струя увеличивается по мере продвижения к поверхности воды. Давление в окружающей воде становится меньше, и область занимаемая природным газом, расширяется. Это является причиной увеличения скорости струи. Кроме того, видно, что вблизи оси симметрии скорость струи больше, чем на её периферии. Из-за взаимодействия с окружающей водой скорость природного газа в вертикальном направлении уменьшается при удалении от оси симметрии в радиальном направлении.

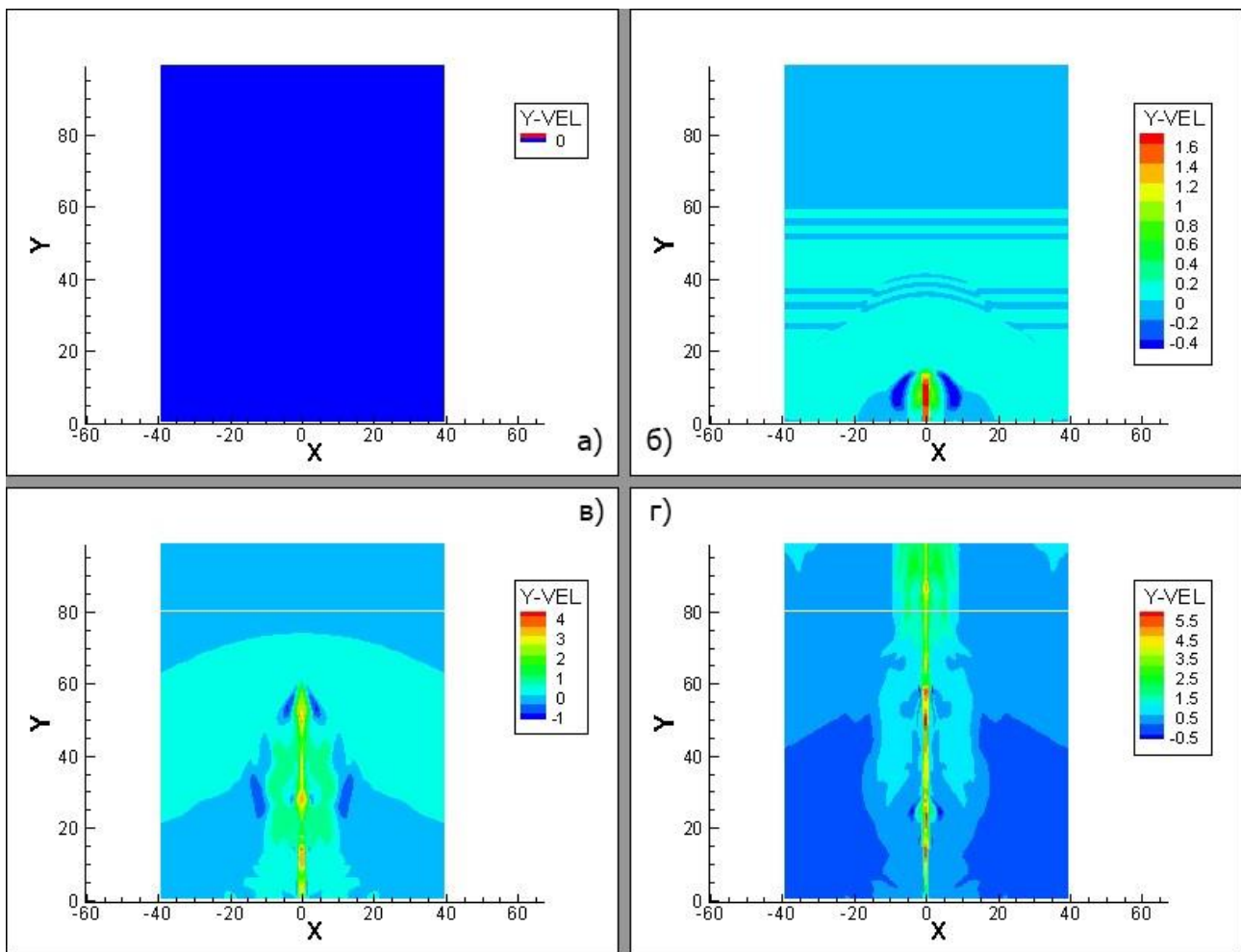


Рис. 3. Распределение вертикальной скорости задачи А: (а) $t=0$ с, (б) $t=146.69$ с, (в) $t=349.34$ с, (г) $t=419.73$ с.

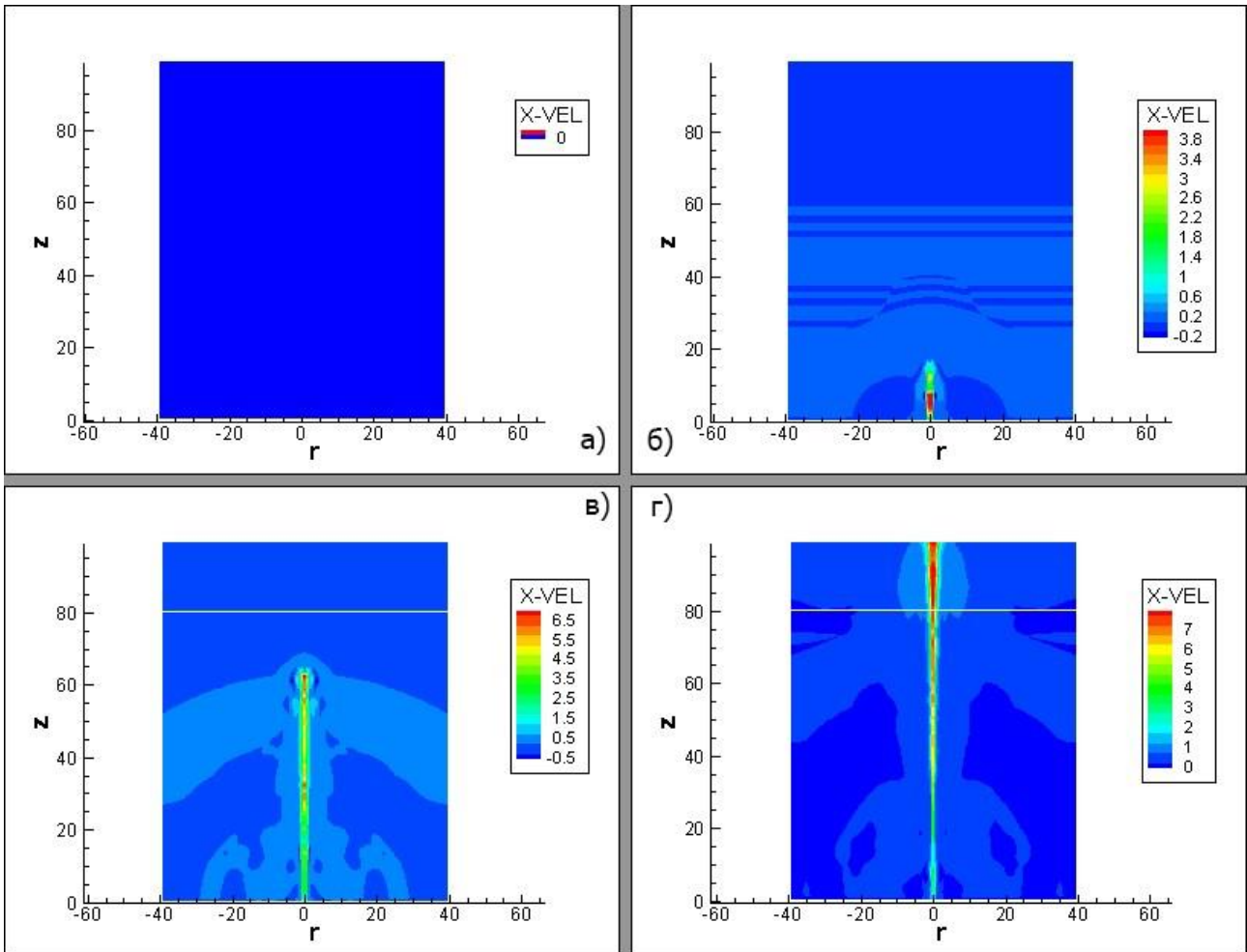


Рис. 4. Распределение вертикальной скорости задачи Б: (а) $t=0\text{с}$, (б) $t=146.32\text{с}$, (в) $t=332.05\text{с}$, (г) $t=435.87\text{с}$.

На рис. 5 и 6 приведено изменение массового расхода на единицу площади во времени на границе разрыва и на свободной поверхности.

В задаче А рассматривается разрыв длиной 1м. Расход в задаче А определяется по формуле

$$q = 2 \int_0^L \rho(x) \cdot V(x) dx, \quad (10)$$

где ρ – плотность природного газа; V – компонента скорости по вертикальному направлению; L – половина ширины разрыва трубопровода.

Расход в задаче Б определяется по формуле

$$q = 2\pi \int_0^R \rho(r) \cdot V(r) \cdot r dr, \quad (11)$$

где ρ – плотность природного газа; V – компонента скорости вдоль оси симметрии; R – радиус разрыва трубопровода.

Интегральная масса природного газа через границу определяется по формуле

$$Q = \int_0^T q dt, \quad (12)$$

где T – рассматриваемый интервал времени.

На границе разрыва расход сначала резко возрастает, потом также резко падает из-за уменьшения разницы давления. В задаче А при $t=373.5$ с природный газ выходит на поверхность воды. Поэтому расход на свободной поверхности сильно возрастает (рис. 5). В задаче Б природный газ вытекает, когда $t=365.2$ с (рис. 6). Для сравнения доли вытекшего метана, определим коэффициент истечения:

$$k = \frac{q_{hm}}{q_{lm}}, \quad (13)$$

где q_{hm} – максимум расхода на верхней границе; q_{lm} – максимум расхода на нижней границе.

В задаче А $k=12.23$, который больше чем $k=12.92$ в задаче Б. Различие объясняется тем, что вертикальная скорость в задаче А больше, чем вертикальная скорость в задаче Б (рис. 3 и 4).

Расход на свободной поверхности падает из-за падения расхода на границе разрыва. После максимума расход остается на низком уровне с небольшими колебаниями. Интегральное значение массы, прошедшей через границу разрыва и через свободную поверхность воды, в зависимости от времени показаны на рис. 7 и 8.

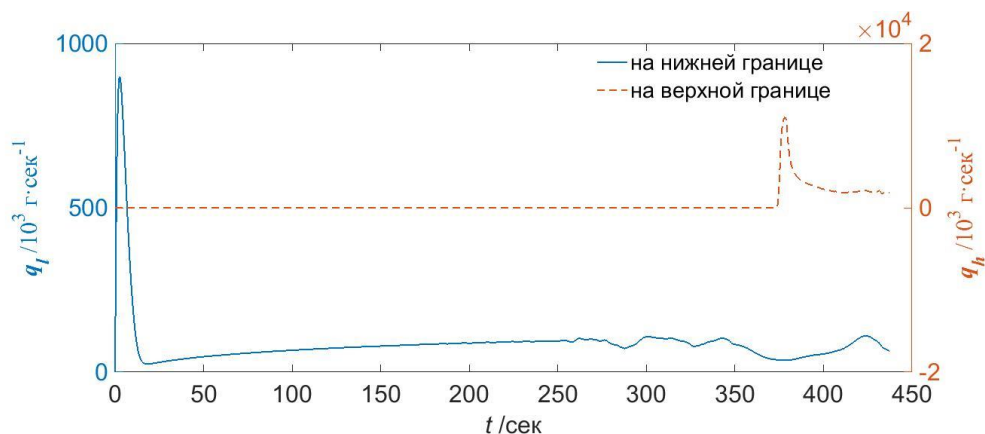


Рис. 5. Массовый расход на границе 1 и на границах 5, 6 в задаче А.

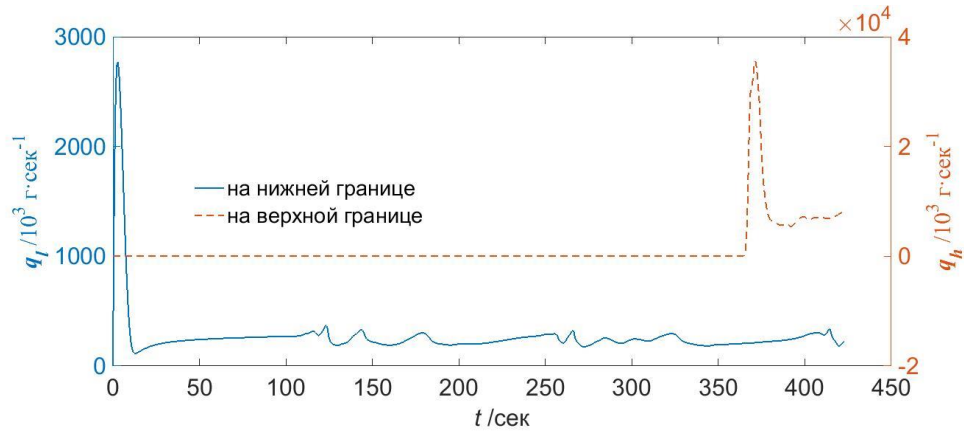


Рис. 6. Массовый расход на границе 3 и на границах 5, 6 в задаче Б.

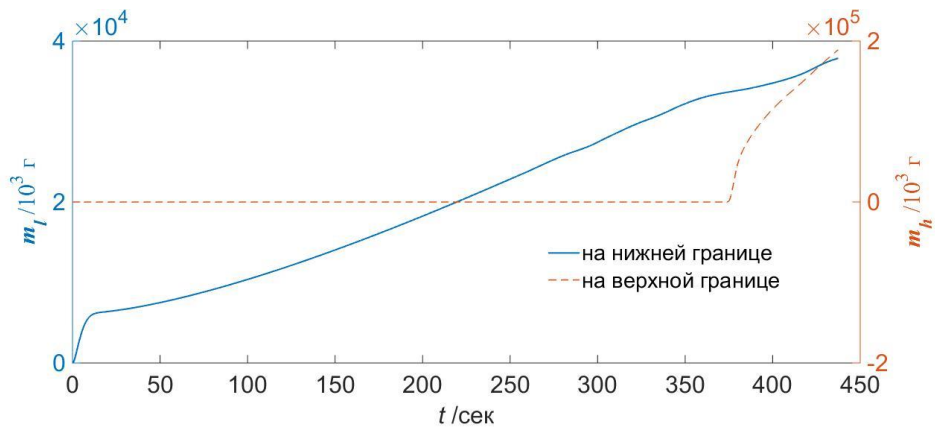


Рис. 7. Интегральная масса природного газа через границу 1 и границы 5, 6 в задаче А.

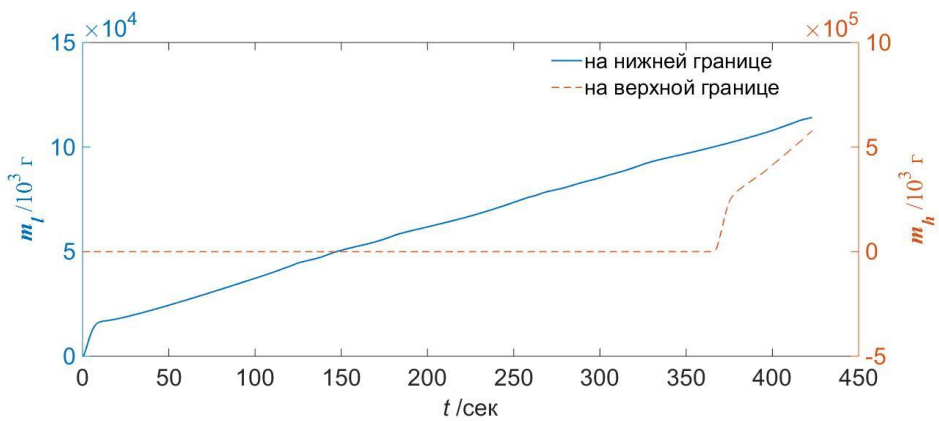


Рис. 8. Интегральная масса природного газа через границу 3 и границы 5, 6 в задаче Б.

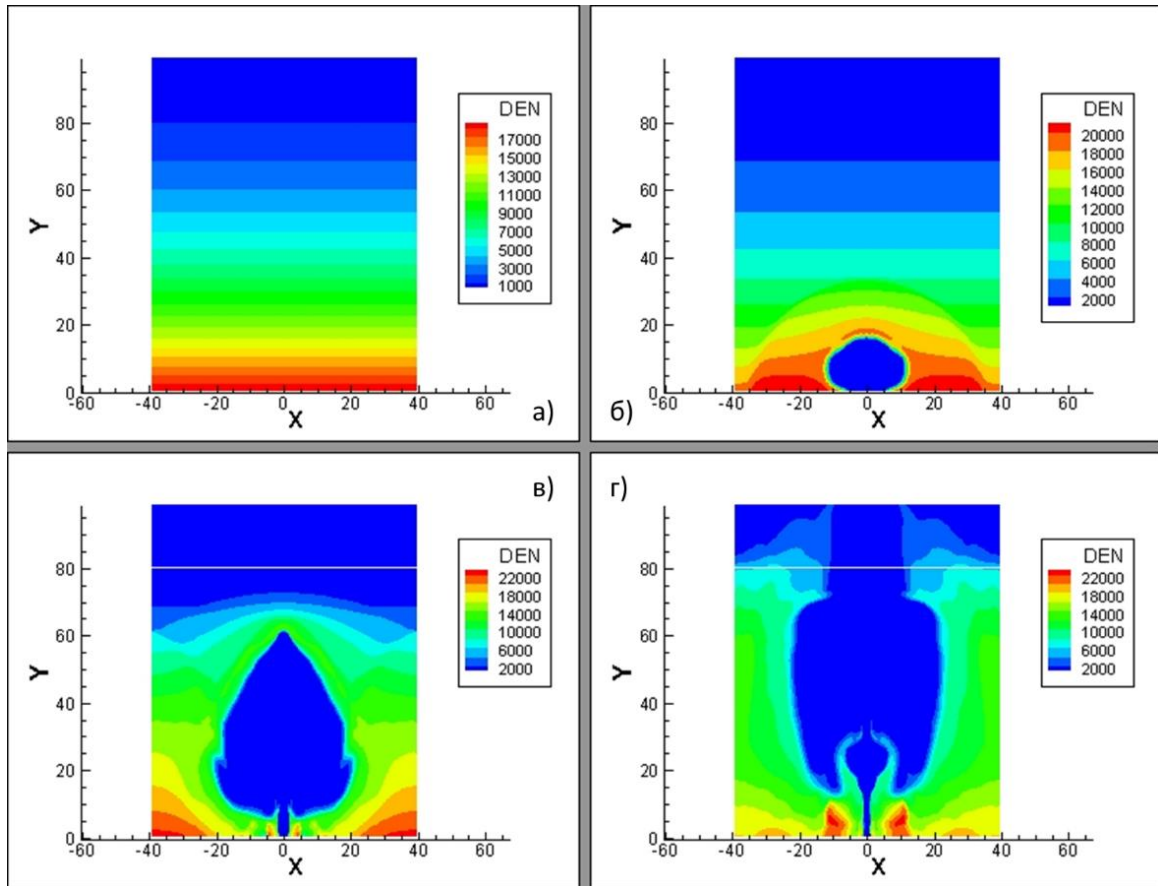


Рис. 9. Распределение плотности в задаче А (а) $t=0\text{s}$, (б) $t=146.69\text{s}$, (в) $t=349.34\text{s}$, (г) $t=419.73\text{s}$.

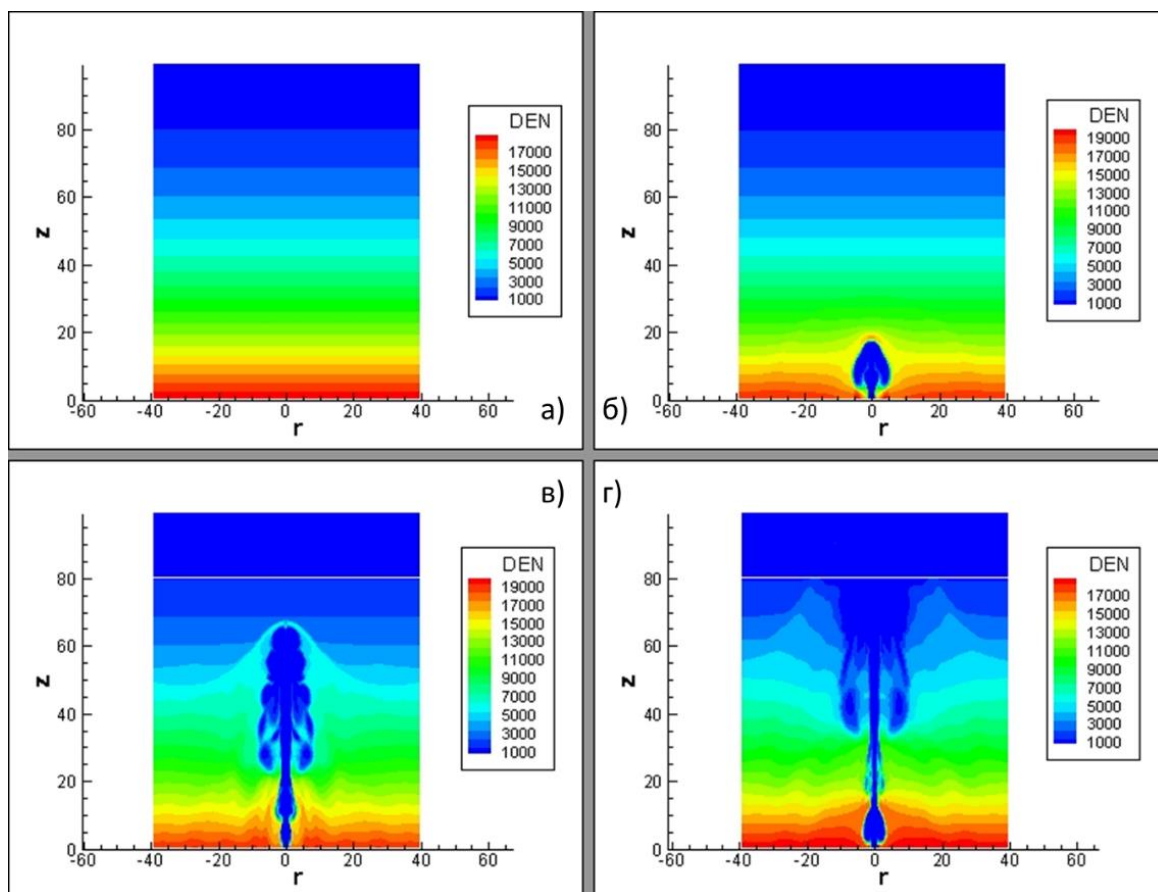


Рис. 10. Распределение плотности в задаче Б: (а) $t=0$ с, (б) $t=146.32$ с, (в) $t=332.05$ с, (г) $t=435.87$ с.

В обеих задачах при истечении струи наблюдается неустойчивость Кельвина-Гельмгольца (рис. 9 и рис. 10), которая обусловлена разницей скоростей струя метана и воды. Между двумя жидкостями возникает вихревая зона. Возмущение скорости развивается со времени и приводит к деформации вихревой зоны между метаном и водой. Возникает цепочка одиночных вихрей в области между газом и водой. Струя метана захватывает воду, и наоборот. На рис. 9 и 10 видно, что струя в задаче А значительно шире, чем в задаче Б, и, соответственно, характер истечения в плоской задаче напоминает всплытие пузыря, в то время как в осесимметричной задаче течение имеет явный характер струйного. Эта особенность объясняется тем, что струя в задаче Б подвергается давлению со всех сторон, а струя в задаче А подвергается давлению только с двух сторон.

Когда струя природного газа приближается к границе между водой и воздухом, поверхность воды повышается из-за импульса струи, и формируется фонтан газа в атмосфере, как видно из рис. 11 и 12. На одной и той же высоте (90м) струя в осесимметричной задаче пробивает межфазную границу между водой и воздухом и приходит в контакт с воздухом, а в плоской задаче струя все ещё находится в окружении воды.

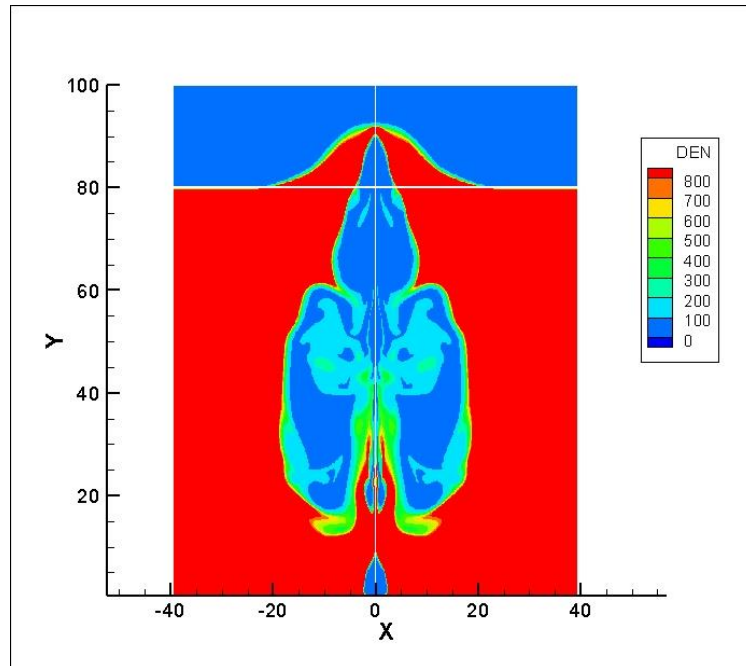


Рис. 11. Образование фонтана на границе между водой и воздухом в задаче А

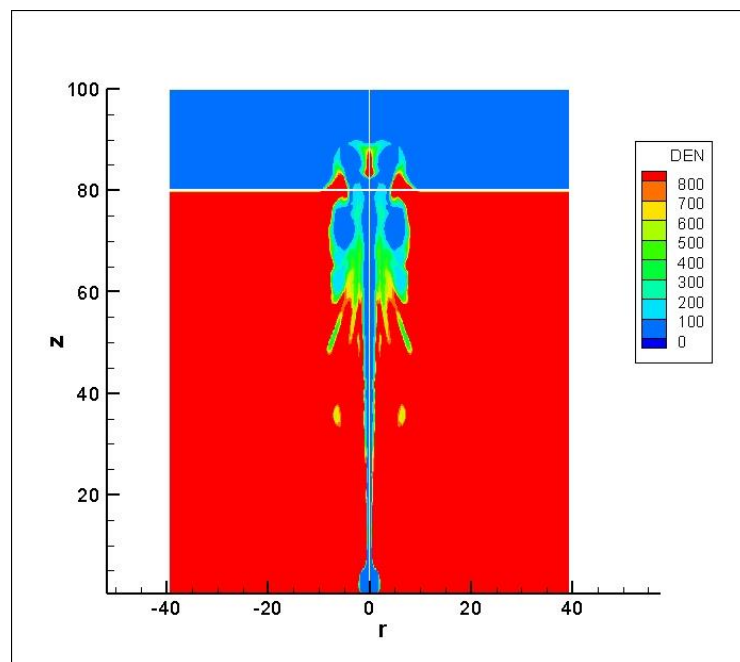


Рис. 12. Образование фонтана на границе между водой и воздухом в задаче Б

Заключение

С помощью математического моделирования, получены следующие выводы, касающиеся задачи истечения природного газа из подводного газопровода:

- (1) Вертикальная скорость струи увеличивается по мере подъема к

поверхности воды, причем вертикальная скорость в осесимметричной задаче больше скорости в плоской задаче.

(2) При истечении природного газа из газопровода на границе разрыва и свободной поверхности расход сначала сильно увеличивается. После достижения максимума расход также резко падает, причем доля истекающего метана в осесимметричной задаче больше доли истекающего метана в плоской задаче.

(3) Струя в радиальном направлении в плоской задаче оказывается значительно шире по сравнению с осесимметричной постановкой.

(4) На границе между водой и воздухом формируется фонтан. В осесимметричной задаче струя метана пробивает границу раньше, чем в плоской задаче.

Библиографический список

1. Friedel M.J., Fannelop T. Bubble plumes and their interaction with the water surface // Applied Ocean Research. 2000. V. 22. P. 347-361. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/journal/01411187/22/2?sdc=1>
2. Einardsrud K.E. Kinetic energy approach to dissolving multiphase plumes // J. Hydraul. 2009. V. 135. N. 12. P. 1041-1051. URL: [http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000128](http://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000128)
3. Fannelop T.K., Sjoen K. Hydrodynamics of underwater blowouts // 18th Aerospace Science Meeting, Pasadena, January 14 -16 1980. Pasadena, 1980. P. 7-33. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1980-219>
4. Milgram J. Mean flow in round bubble plumes // J. Fluid Mech. 1983. V. 133. P. 345-376. URL: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/S0022112083001950>
5. Fannelop T.K., Horschberg S., Kuffer J. Surface current and recirculating cells generated by bubble curtains and jets // Journal of Fluid Mechanics. 1991. V. 229. P. 629-657. URL: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/surface-current-and-recirculating-cells-generated-by-bubble-curtains-and-jets/FA197F0A29AC72CF921AC60D58CF54A5>
6. Very large deep-set bubble plumes from broken gas pipelines : под ред. Т.К. Fannelop, Marco В. //Электрон. дан. Режим доступа URL: [http://www.ptil.no/getfile.php/136431/PDF/Modeller-gassutslipp under vann.pdf](http://www.ptil.no/getfile.php/136431/PDF/Modeller-gassutslipp%20under%20vann.pdf)
7. Ostein J. DeepBlow – a lagrangian plume model for deep water blowouts //Spill science & technology bulletin. 2000. V. 6. N. 2. P. 103 - 111. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256100000426>
8. Ostein J., Henrik R., Cortis C. DeepSpill –field study of a simulated oil and gas blowout in deep water //Spill science & technology bulletin. 2000. V. 8. N. 5. P. 433-443. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1353256102001238>
9. Pan Q.Q., Olsen J.E. Reed M. CFD study of surfaceflow and gas dispersion from a subsea gas release // ASME 2014 33rdInternational Conference on Ocean Offshore and Arctic Engineering, SanFrancisco, June 8 -13, 2014. SanFrancisco, 2014. P. 1-6. URL: <https://www.sintef.no/publikasjoner/publikasjon/?pubid=CRISin+1169570>
10. Cloette S., Olsen J.E. CFD modeling of plume and surface behavior resulting from sub-sea gas release // Applied ocean research. 2009. V. 31. P. 220-225. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141118709000881>
11. Men'shov I., Nakamura Y. Numerical simulations and experimental comparisons for high speed nonequilibrium air flows //Fluid dynamics research journal. 2000. V. 27. N. 5. P. 305-334. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169598300000101>
12. Men'shov I., Nakamura Y. On implicit Godunov's method with exactly

- linearized numerical flux // *Computers & Fluids*. 2000. V. 29. N. 6. P. 595 – 616.
URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045793099000201>
13. Men'shov I., Nakamura Y. Hybrid Explicit–Implicit, Unconditionally Stable Scheme for Unsteady Compressible Flows // *AIAA Journal*. 2004. V. 42. N. 3. P. 551-559. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/1.9109?journalCode=aiaaj>
14. Jameson A., Turkel E. Implicit schemes and LU decomposition // *Math.of Comp.* 1981. V. 37. N. 156. P.385-397. URL: <http://www.ams.org/journals/mcom/1981-37-156/S0025-5718-1981-0628702-9/S0025-5718-1981-0628702-9.pdf>