

УДК 621.6

Варсегов Александр Владиславович

инженер

E-mail: alexandervav@mail.ru

ООО «Газпром трансгаз Казань» Инженерно-технический центр

Адрес организации: 420075, Россия, г. Казань, ул. 3-ая Кленовая, д. 25

Варсегова Евгения Владиславовна

кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Осипова Лилия Эдуардовна

кандидат технических наук, доцент

E-mail: osipovalilija@mail.ru

Садыков Ренат Ахатович

доктор технических наук, профессор

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

Зоны поражения при аварийной разгерметизации газопровода

Аннотация

Постановка задачи. Магистральные газопроводы относят к категории энергонапряженных объектов. С увеличением их срока эксплуатации есть необходимость моделирования аварийных разрывов и анализа распространения поражающих факторов аварии. В статье для участка газопровода высокого давления смоделирован аварийный разрыв и численно решена тестовая задача, которая позволяет рассчитать в зависимости от диаметра газопровода и режима перекачки давление в точке разрыва, высоту выброса и возможную зону загазованности.

Результаты. Был проведен численный эксперимент стационарного истечения газа – метана из газопровода высокого давления. Получены зависимости распределения полного давления и скорости по оси выброса газа. Определена зона возможного токсического воздействия на человека и животных, а также граница зоны потенциального термического воздействия при условии наличия внешних источников зажигания.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что зная параметры свободного струйного истечения газа при возможной аварийной разгерметизации газопровода, можно рассчитать по известным методикам зоны загазованности, что повышает безопасность селитебной застройки при проектировании трассы газовых сетей.

Ключевые слова: газопровод, аварийная разгерметизация, высота выброса, численное моделирование, зона загазованности.

Введение

Природный газ один из наиболее распространенных энергоносителей, а изучение возможных разрывов газопроводов определяет техногенную безопасность энергетических объектов транспорта газа и повышает энергобезопасность населенных пунктов. Анализ эксплуатации трубопроводного транспорта углеводородов проводят многие авторы, систематизируя сведения официальной статистики по авариям Ростехнадзора и отчеты зарубежных организаций таких, как Европейская группа по сбору данных об авариях на газопроводах – EGIG European (Gas Pipeline Incident Data Group), Ассоциация операторов магистральных сухопутных газопроводов Великобритании – UKOPA (United Kingdom Onshore Pipeline Operators' Association) и Ассоциация операторов западноевропейских магистральных нефтепроводов – CONCAWE (CONservation of Clean Air and Water in Europe) [1-2]. Так аварийность на магистральных газопроводах по данным Ростехнадзора составляет $\lambda_{cp} = 0,07$ ав./1000 км в год, по данным EGIG $\lambda_{cp} = 0,18$ ав./1000 км в год и по данным UKOPA $\lambda_{cp} = 0,105$ ав./1000 км в год). Но зарубежные организации учитывают данные по аварийности на газопроводах малого диаметра, $d \leq 5''$ (125 мм) [2].

В работе [3] рассмотрены методы численного анализа трубопроводного транспорта и режимов безопасной эксплуатации. Газодинамические параметры потока газа в газопроводе – скорость, плотность и давление определяют размеры зон загазованности, а метеоусловия атмосферы влияют на перемещение образовавшегося газоздушного облака. Для утилизации аварийных сбросов газов из емкостного оборудования и трубопроводов используют свечи рассеивания. В [4] предложена математическая модель для описания турбулентного распространения аварийного выброса газа через свечи рассеивания, с привлечением программного комплекса ANSYS (Fluent), и разработан экспресс-метод оперативной экологической оценки обстановки с учетом метеоусловий атмосферы.

Согласно доступной информации Ростехнадзора в 2018 году на газопроводах произошло 10 аварий, по сравнению с 2017 годом (5 аварий) количество аварий увеличилось в 2 раза. Основной вклад в аварийность на объектах трубопроводного транспорта приходится на линейную часть. В случае аварийной разгерметизации линейной части, разрыв «трещина» или «гильотинный разрыв», современные средства телемеханики и автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) определяют место разрыва и прямые потери. В настоящее время беспилотные летательные аппараты (БПЛА) проводят мониторинг, как объектов магистрального транспорта, так и местности. БПЛА мобильны и способны оперативно определять место утечки, прямые потери транспортируемого продукта, а так же выполнять контроль строительно-монтажных работ (СМР) и контроль проведения ликвидации аварийной ситуации. Если разрыв малого размера типа «свищ», то место разрыва по загазованности атмосферы определяют обходчики приборами контроля – газоанализаторами. При этом на пространственно-временное распространение газоздушного облака в атмосфере влияют метеоусловия и наличие застройки [5-7].

В целом, современные авторы успешно применяют численное моделирование при решении задач струйного истечения газа при разгерметизации трубопроводов [8-10].

Основными параметрами, которые влияют на интенсивность истечения метана, являются внутренний диаметр газопровода, фактическое доаварийное давление газа в точке разрыва и ее местоположение, а также размеры разрыва и время отсечения аварийных участков.

Смоделирован разрыв малого размера $d = 0,1$ м, типа «свищ» на газопроводе диаметром $D = 1420$ мм, на участке длиной $L_1 = 10$ м и рабочим давлением транспортировки $P = 7,5$ МПа. На рис. 1а представлена схема участка газопровода между компрессорными станциями $KC1$ и $KC2$ длиной L . Направление движения газа – слева направо.

Течение газа по газопроводу моделируется в стационарной двухмерной постановке при помощи программного комплекса ANSYS (Fluent)¹. Геометрия канала представлена на рис. 1б.

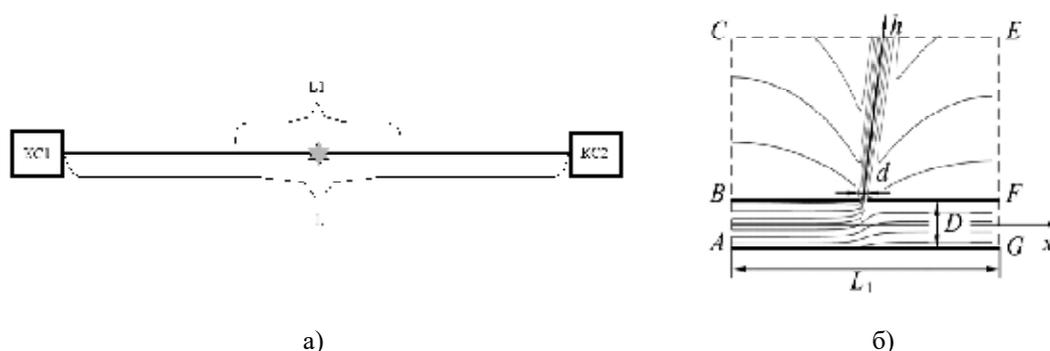


Рис. 1. Постановка тестовой задачи:

- а) схема участка газопровода между компрессорными станциями $KC1$ и $KC2$ длиной L (СТО Газпром 2-2.3-351-2009);
б) фрагмент газопровода в области разрыва (с линиями тока течения) (иллюстрация авторов)

¹ANSYS® Academic Research Mechanical and CFD, Release 18.2.

Уравнениями газовой динамики для описания стационарных турбулентных течений являются уравнения Навье-Стокса осредненные.

Уравнения движения:

$$\begin{aligned} v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v_x}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v_x}{\partial y} \right], \\ v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v_y}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[(\mu + \mu_T) \frac{\partial v_y}{\partial y} \right], \end{aligned} \quad (1)$$

где v_x, v_y – осредненные по времени проекции вектора скорости на оси координат x и y , соответственно, м/с;

p – осредненное гидродинамическое давление, Па;

$\mu = 1,087 \cdot 10^5$ Па·с – динамический коэффициент вязкости метана;

$\rho = 0,679$ кг/м³ – плотность метана;

μ_T – турбулентная вязкость.

Уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0. \quad (2)$$

Уравнение энергии:

$$v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(a_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(a_T \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad (3)$$

где T – осредненная температура, К;

$\lambda = 0,0332$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности;

$c_p = 2222$ Дж/(кг·К) – теплоемкость;

a_T – турбулентная температуропроводность.

Основная система уравнений движения (1)-(3) замыкалась уравнениями «стандартной» модели турбулентности $k-\varepsilon$ с использованием «стандартных» пристеночных функций при моделировании течения в пограничном слое [7].

Уравнение турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} v_x \frac{\partial k}{\partial x} + v_y \frac{\partial k}{\partial y} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial y} \right] - \\ &- k \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + G_k - \varepsilon - Y_M + S_k, \end{aligned} \quad (4)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности;

ε – диссипация кинетической энергии;

$\mu_T = C_\mu k^2 / \varepsilon$; $G_k = \mu_T S^2$;

S – инвариант тензора деформаций;

$Y_M = 2\varepsilon M_T^2$ – вклад переменного расширения при турбулентности сжатия в скорость диссипации;

$M_T = \sqrt{k} / a^2$ – число Маха для турбулентного газа;

$a = \sqrt{\gamma RT} = 436$ м/с – скорость звука при $T = 281,7$ К;

$\gamma = 1,385$ – показатель адиабаты;

$R = 519$ Дж/(кг·К) – газовая постоянная;

эмпирические константы: $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,44$.

Уравнение скорости диссипации турбулентной кинетической энергии:

$$\begin{aligned} v_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + v_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right] + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right] - \\ &- \varepsilon \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon, \end{aligned} \quad (5)$$

где $C_{1\varepsilon} = 1,44$; $C_{2\varepsilon} = 1,92$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Уравнения (1)-(5) дополняются следующими граничными условиями (рис. 1 а):

- *AB*:

$$p_s = 7,5 \cdot 10^6; \quad p = p_s \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}}; \quad M = 1,64 \text{ при } x = 0 \text{ и } 0 < y < 1,420;$$

- *FG*:

$$p = 7,5 \cdot 10^6 \text{ при } x = 10 \text{ и } 0 < y < 1,420;$$

- *BCEF*:

$$p = 101325 \text{ при } x = 0 \text{ и } 1,42 < y < 20;$$

$$0 < x < 10 \text{ и } y = 20;$$

$$x = 10 \text{ и } 1,42 < y < 20;$$

- *AG, BF*:

$$v_x = v_y = 0 \text{ при } 0 < x < 10 \text{ и } y = 0;$$

$$0 < x < 4,95 \text{ и } y = 1,42;$$

$$5,05 < x < 10 \text{ и } y = 1,42.$$

Согласно полученным результатам, если по трубе в стационарном режиме транспортируется $Q_{\text{вх}} = 646$ кг/с метана, то в атмосферу выбрасывается $Q_{\text{выб}} = 232$ кг/с, а к потребителю после разрыва доходит только $Q_{\text{пот}} = 414$ кг/с. На рис. 2 представлены результаты расчета распределения статического и полного давления по высоте выброса. Как видно из графиков, давление газа в точке разрыва составляет $P = 4,3$ МПа и примерно на высоте $h = 2$ м давление равно атмосферному (рис. 2а).

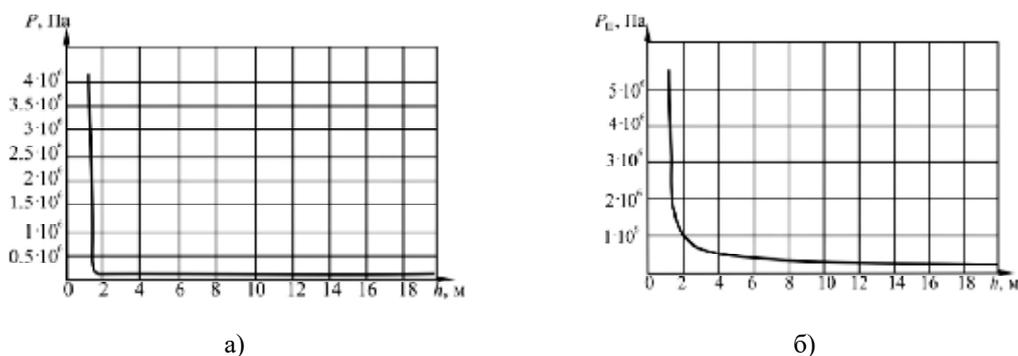


Рис. 2. Распределение давления по оси выброса:

- а) изменение статического давления по высоте (иллюстрация авторов);
б) изменение полного давления по высоте (иллюстрация авторов)

На рис. 3 показано распределение скоростей по оси выбрасываемой струи и по оси трубопровода. Из-за изменения расхода в газопроводе, скорость газа значительно падает после точки разрыва (рис. 3а), а вот скорость в струе, напротив, остается достаточно высокой даже на высоте $h = 20$ м (рис. 3б). Скорость газа в точке разрыва составляет $|v| = 2662$ м/с.

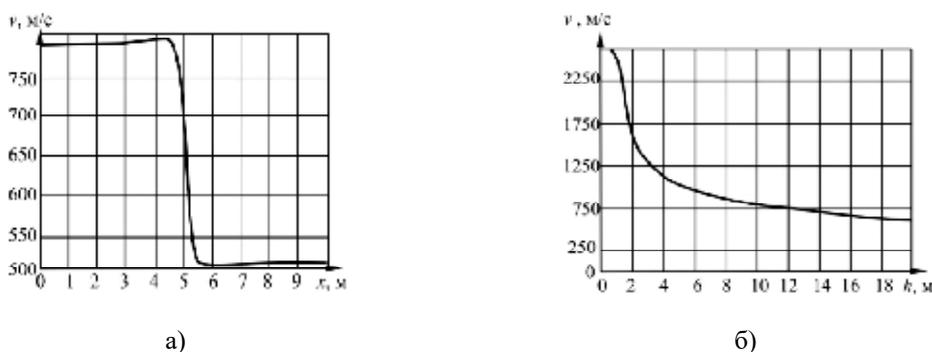


Рис. 3. Распределение скоростей:

- а) изменение скорости по оси газопровода (иллюстрация авторов);
б) изменение скорости по высоте выброса (иллюстрация авторов)

Параметры свободного струйного истечения природного газа (метана) из поврежденного трубопровода: общий расход, полное давление и скорость потока в точке разрыва, используются при разработке методик ПАО «Газпром» на объектах трубопроводного транспорта.

При аварийной разгерметизации типа «свищ» происходит «прорастание» разрыва по длине диаметра газопровода. С течением времени наблюдается торможение и остановка дальнейшего разрушения газопровода, т.е. образуется разрыв типа «трещина». Если нет источника зажигания, и газ не воспламеняется, то происходит его дисперсия в атмосфере с образованием поражающего фактора аварии – загазованности. Расчет данного поражающего фактора аварии на магистральных газопроводах рекомендует проводить ПАО «Газпром» по методике СТО Газпром 2-2.3-351-2009.

Рассчитаны параметры облака газа, сформированного при истечении сверхзвуковой струи газа. Для критических условий ($M = 1$ – число Маха) газодинамические параметры потока в выходном сечении (индекс «E») определяются по формулам:

– скорость потока:

$$u_E = a_E = \left(\frac{2 \cdot \gamma}{\gamma + 1} \cdot R \cdot T_0 \right)^{1/2}; \quad (6)$$

– плотность потока:

$$\rho_E \equiv \rho_E(t) = \frac{4 \cdot G_E(t)}{a_E \cdot \pi \cdot D^2}; \quad (7)$$

– давление потока:

$$P_E \equiv P_E(t) = \frac{2}{\gamma + 1} \cdot \rho_E(t) \cdot R \cdot T_0 > P_a, \quad (8)$$

где u_E – скорость газа в сечении разрыва, м/с;

a_E – местная скорость звука, м/с;

G_E – расход газа, кг/с;

P_a – атмосферное давление, Па;

T_0 – температура транспортируемого газа в месте разрыва до аварии, К.

После выхода метана из «трещины» газопровода на определенном участке на расстоянии нескольких диаметров трубы происходит превышение статического давления газа над атмосферным. При этом происходит его изэнтропическое расширение с разгоном потока до сверхзвуковых скоростей ($M > 1$) и формированием системы скачков уплотнения. Для данного участка течения характерна существенная неравномерность потока. При этом из-за наличия скачков уплотнения происходит потеря полного давления. В конце данного участка давление в поперечной плоскости течения выравнивается и становится равным атмосферному. Данное сечение в газовой динамике получило название «ударная плоскость». Значение безразмерной скорости в «ударной плоскости» определяется по формуле:

$$\lambda_s = 1 + \frac{P_E - P_a}{\rho_E \cdot u_E^2}, \quad (9)$$

здесь индекс «s» соответствует параметрам в ударной плоскости.

Значения температуры, числа Маха, плотности и диаметра эквивалентного сечения струи в ударной плоскости рассчитываются, соответственно, по формулам:

$$T_s = T_0 \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda_s^2 \right), \quad (10)$$

$$M_s = \frac{\lambda_s \cdot a_E}{\sqrt{\gamma \cdot R \cdot T_s}}, \quad (11)$$

$$\rho_s = \frac{P_a}{R \cdot T_s}, \quad (12)$$

$$d_s = D \cdot \sqrt{\frac{\rho_E}{\rho_s \cdot M_s}}. \quad (13)$$

Распределение скорости и объемной концентрации по осевой координате (ξ) на расстояниях, существенно превышающих длину участка расширения, описывается функциями:

– для струй, распространяющихся в неограниченном воздушном пространстве:

$$u_m(\xi) = c_m(\xi) = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \cdot \frac{12,4}{\xi \cdot \varphi(M_s)}; \quad (14)$$

– для настильных струй, распространяющихся вдоль поверхности земли:

$$u_m(\xi) = c_m(\xi) = \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_a}} \cdot \frac{15,5}{\xi \cdot \varphi(M_s)}, \quad (15)$$

где ρ_a – плотность атмосферного воздуха, кг/м^3 , а функция $\varphi(M_s)$ определяется следующим образом:

$$\varphi(M_s) = 1 - 0,4 \cdot \sqrt{M_s - 1,2}. \quad (16)$$

Безразмерная координата определяется из соотношения:

$$\bar{\xi} = \frac{2 \cdot \xi}{d_s}. \quad (17)$$

По формулам (9)-(17) был проведен расчет. Результаты расчета представлены в таблице.

Таблица

<i>Исходные данные:</i>		
Диаметр газопровода, мм	D	1420
Массовый расход, кг/с	G_E	650
Температура транспортируемого газа в месте разрыва до аварии, К	T_0	283
<i>Результаты расчета:</i>		
Скорость потока в выходном сечении, м/с	u_E	409,12
Плотность газа в выходном сечении, кг/м^3	ρ_E	13,49
Давление газа в выходном сечении, Па	P_E	1698590
Газодинамический параметр скорости в ударной плоскости	λ_S	1,71
Температура газа в ударной плоскости, °К	T_S	166,2
Число Маха	M_S	2,06
Плотность газа в ударной плоскости, кг/м^3	ρ_S	1,18
Диаметр эквивалентного сечения в ударной плоскости, м	d_S	3,31

Для начального промежутка времени $t = 0,25$ мин по формуле (14) рассчитана зона газозащитности. Длина струи метана в неограниченном воздушном пространстве для соответствующих концентрационных пределов, не превышает 600 м (рис. 4).

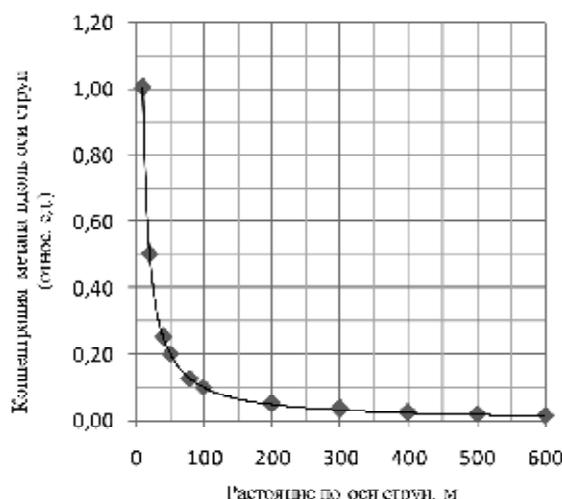


Рис. 4. Длина струи при свободном истечении при сверхкритических параметрах в неподвижную атмосферу при времени истечения $t = 0,25$ мин (иллюстрация авторов)

При аварии в случае невоспламенения газа происходит его рассеивание в атмосфере с образованием зон загазованности, границы которых рекомендуют определять по двум концентрационным пределам метана. Так концентрация 30 % об. метана определяет границу зоны токсического воздействия на человека и животных, а 5 % об. – границу зоны потенциального термического воздействия при условии наличия внешних источников зажигания. Как видно из рис. 4 зона возможного токсического воздействия на человека и животных с концентрацией 30 % об. метана соответствует расстоянию примерно 50 метров. А 5 % об. – граница зоны потенциального термического воздействия при условии наличия внешних источников зажигания составляет 300 метров.

Заключение

Используя пакет программы ANSYS (Fluent), смоделирован аварийный разрыв газопровода малого размера. Был проведен численный эксперимент стационарного истечения газа – метана из газопровода высокого давления ($P = 7,5$ МПа) и $D = 1420$ мм. Получены зависимости распределения полного давления и скорости по оси выброса газа. Результаты расчётов представлены наглядно в графической форме.

Результаты численного исследования позволяют разработать многовариантную тестовую задачу по аварийной разгерметизации газопроводов, что актуально при решении прикладных задач анализа риска при проектировании газопроводов.

Список библиографических ссылок

1. Кушнарева О. В., Голубаев Д. В. Анализ причин аварий на объектах магистрального транспорта нефти и газа: проблемы и решения // MASTER'S JOURNAL. 2018. № 1. С. 37–43.
2. Лисанов А. М. Сравнение и анализ отечественных и зарубежных данных по аварийности на объектах магистрального трубопроводного транспорта : сб. ст. Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 20-летию принятия Федерального закона № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» / Москва, 2017. С. 155–158.
3. Селезнев В. Е., Алешин В. В., Прялов С. Н. Основы численного моделирования магистральных трубопроводов. М. : МАКС Пресс, 2009. 436 с.
4. Купцов А. И., Гимранов Ф. М. Свеча рассеивания: основы расчета. Казань : АН РТ, 2018. 136 с.
5. Ортина М. Н., Купцов А. И., Гимранов Ф. М. Математическое моделирование рассеивания облаков тяжелых газов в условиях промышленной застройки: влияние метеословий // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 10. С. 115–118.
6. Santos J. M., Reis Jr. N. C., Goulatr E. V., Mavroidis I. Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification // Atmospheric Environment. 2009. № 43. P. 5484–5492.
7. Tauseef S. M., Rashtchian D. R., Abbasi S. A. CFD based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2011. № 24. P. 371–376.
8. Зиганшин А. М., Батрова К. Э., Гимадиева Г. А. Численное определение характеристик течения через последнее боковое отверстие в воздуховоде // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2018. № 7 (715). С. 53–65.
9. Pieterse J. E., Harms T. CFD investigation of the atmospheric boundary layer under different thermal stability conditions // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2013. Vol. 121. P. 82–97.
10. Russell A. Computational fluid dynamics modeling of atmospheric flow applied to wind energy research : A thesis Master of Science in Mechanical Engineering. Boise State University, December, 2009. P. 19–25.

Varsegov Alexander Vladislavovich

engineer

E-mail: alexandervav@mail.ru**LLC «Gazprom Transgaz Kazan» Engineering Technical Center**

The organization address: 420075, Russia, Kazan, 3d Klenovaya st., 25

Varsegova Evgeniya Vladislavovna

candidate of physical-mathematical sciences, associate professor

E-mail: evarsegova@yandex.ru**Osipova Liliya Eduardovna**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: osipovalilija@mail.ru**Sadykov Renat Akhatovich**

doctor of technical sciences, professor

E-mail: sadykov_r_a@mail.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Areas of damage during emergency on the gas pipeline**Abstract**

Problem statement. Main gas pipelines are classified as energetically stressed objects. With the increase in their service life, there is a need to model an emergency breaks and analyze the distribution of the damaging factors of the accident. In the article, the emergency rupture was simulated for a section of a high pressure gas pipeline and a test problem was numerically solved, which allows calculating the pressure at the rupture point, the discharge height, and the possible gas zone depending on the diameter of the gas pipeline and the pumping mode.

Results. A numerical experiment was conducted on a stationary outflow of gas – methane from a high pressure gas pipeline. The dependences of the distribution of the total pressure and velocity along the axis of the gas ejection are obtained. The zone of possible toxic effects on humans and animals, as well as the boundary of the zone of potential thermal effects, provided that there are external sources of ignition, are determined.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the fact that, knowing the parameters of free jet gas outflow during a possible emergency depressurization of the gas pipeline, it is possible to calculate the gas zone by the known methods, which increases the safety of residential buildings during the design of gas pipelines.

Keywords: gas pipeline, emergency depressurization, discharge height, numerical simulation, gas zone.

References

1. Kushnaryova O. V., Golubaev D. V. Analysis of causes of accident on midstream operations facilities: challenges and solutions // MASTER'S JOURNAL. 2018. № 1. P. 37–43.
2. Lisanov A. M. Comparison and analysis of domestic and foreign accident data at the main pipeline transport facilities : dig. of art. All-Russian Scientific and Practical Conference dedicated to the 20th anniversary of the adoption of Federal Law №. 116-FZ «On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities» / Moscow, 2017. P. 155–158.
3. Seleznev V. E., Aleshin V. V., Pryalov S. N. Fundamentals of numerical modeling of trunk pipelines. M. : MAKS Press, 2009. 436 p.
4. Kuptsov A. I., Gimranov F. M. Candle of dispersion: calculation basics. Kazan : AS RT, 2018. 136 p.
5. Ortina M. N., Kuptsov A. I., Gimranov F. M. Mathematical modeling of dispersion of clouds of heavy gases in industrial conditions: the influence of weather conditions // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 20, № 10. P. 115–118.

6. Santos J. M., Reis Jr. N. C., Goulatr E. V., Mavroidis I. Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification // *Atmospheric Environment*. 2009. № 43. P. 5484–5492.
7. Tauseef S. M., Rashtchian D. R., Abbasi S. A. CFD based simulation of dense gas dispersion in presence of obstacles // *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2011. № 24. P. 371–376.
8. Ziganshin A. M., Batrova K. E., Gimadieva G. A. Numerical determination of flow characteristics through the last lateral opening in the air duct // *Izvestiya vysschih uchebnykh zavedeniy. Stroitelstvo* 2018. № 7 (715). P. 53–65.
9. Pieterse J. E., Harms T. CFD investigation of the atmospheric boundary layer under different thermal stability conditions // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2013. Vol. 121. P. 82–97.
10. Russell A. Computational fluid dynamics modeling of atmospheric flow applied to wind energy research : A thesis Master of Science in Mechanical Engineering. Boise State University, December, 2009. P. 19–25.