



УДК 621.6

Осипова Лилия Эдуардовна

кандидат технических наук, доцент

E-mail: osipovalilija@mail.ru

Варсегова Евгения Владиславовна

кандидат физико-математических наук, доцент

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

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

Варсегов Александр Владиславович

инженер

E-mail: alexandervav@mail.ru

ОАО «Газпром трансгаз Казань»

Адрес организации: 420073, Россия, г. Казань, ул. А. Кутуя, д. 41

К расчету распространения поражающих факторов аварий на газопроводах

Аннотация

Постановка задачи. В Российской Федерации единая система газоснабжения с диаметром трубопроводов до 2,6 м, которые в течение всего срока эксплуатации подвергаются значительным внутренним и внешним нагрузкам. Поскольку трассы магистральных газопроводов имеют в основном подземную прокладку, проходят по селитебным территориям, пересекают дороги или иные коммуникации, то возможные аварии с выбросом газа с последующим пожаром или взрывом могут привести к катастрофическим последствиям, как для окружающей среды, так и для населения. Расчет интенсивности истечения аварийных выбросов газа и определение зон возможного разлета фрагментов трубы и грунта необходим при расследовании аварии и разработке документов, связанных с безопасностью эксплуатации трубопроводного транспорта, а так же при определении размера компенсационных выплат.

Результаты. Для участка газопровода высокого давления с диаметром $d = 1420$ мм, рабочим давлением $P_{\text{нар}} = 7,5$ МПа и протяженностью $L = 120$ км рассчитан график суммарной динамики истечения газа (разрыв газопровода – гильотинный, на полное сечение) и определено время полного опорожнения. Определены размеры зон (на поверхности земли) разлета обломков трубы и фрагментов грунта.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в том, что они позволяют оценить масштабы возможной аварии уже на стадии проектирования. Найденное пространственное распределение параметров разлета обломков трубы и фрагментов грунта (дальность, высота и время) дает возможность провести оценку последствия ударных воздействий.

Ключевые слова: авария, газопровод, разгерметизация, интенсивность истечения, ударное воздействие.

Введение

Известны работы, в которых рассмотрены методы поддержания эксплуатационной безопасности магистральных газопроводов (МГ) [1-3]. Оптимизация трассировки газовых сетей не только снижает потребление газа, но и повышает безаварийную эксплуатацию газопроводов уже на стадии проектирования [4]. Расчет распространения поражающих факторов аварий на газопроводах позволяет оценить с достаточной долей вероятности возможные зоны поражения и масштабы последствий аварии [5-8].

При оценке последствий возможной аварии в первую очередь рассчитывают интенсивность истечения газа из разрыва трубопровода. Основными параметрами, которые влияют на интенсивность истечения, являются внутренний диаметр газопровода, фактическое доаварийное давление газа в точке разрыва, местоположение точки разрыва и время отсечения аварийных участков. Время отсечения определяется уровнем автоматизации средств технологического контроля и управления. Если операторы с

помощью средств дистанционного контроля перекрывают задвижки газопровода, то время отсечения зависит от алгоритма идентификации факта аварии и реакции диспетчера. Если сработала автоматическая защита газопровода при возникновении аварийной ситуации, то время отсечения минимальное.

Расчет поражающих факторов рекомендует проводить ПАО «Газпром» по методике СТО Газпром 2-2.3-351-2009, где определены методические подходы, термины и определения, а также процедуры и требования к оформлению результатов количественного анализа техногенного риска, обусловленного авариями и инцидентами на опасных производственных объектах транспорта газа и газового конденсата, подземных хранилищ газа. Расчет интенсивности истечения при аварийной разгерметизации газопровода требует строгого определения характеристик транспортируемого газа. В работе [9] приведен расчет параметров природного газа в зависимости от температуры и давления, которые были приняты в дальнейшем при проведении расчета массы аварийного выброса газа.

Постановка задачи

Смоделирован разрыв участка газопровода – «гильотинный», на полное сечение (рис. 1). Разрыв делит газопровод на два аварийных участка L_1 и L_2 , для каждого участка рассчитывается массовый расход газа $G_1(t)$ и $G_2(t)$.

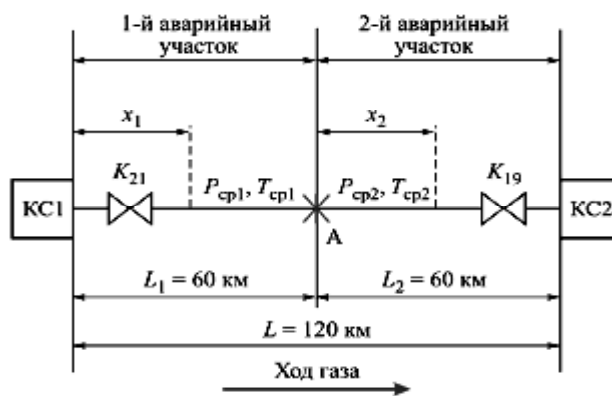


Рис. 1. Расчетная схема газопровода [9]

График суммарной динамики истечения газа

Согласно методическим указаниям СТО Газпром 2-2.3-351-2009 проведен расчет расход газа. Динамика суммарного истечения газа из двух концов трубопровода, представлена на рис. 2. Результаты расчета приведены в табл. 1.

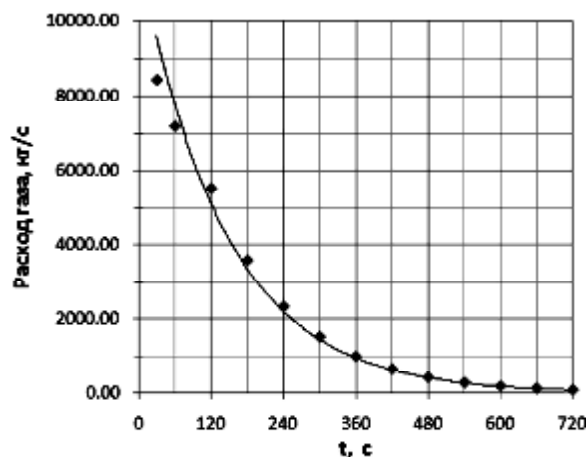


Рис. 2. Динамика суммарного истечения газа из двух концов газопровода (иллюстрация авторов)

Таблица 1

<i>Исходные данные:</i>			
Коэффициент гидравлического сопротивления	λ	0,0115	
Диаметр трубопровода, мм	d_0	1400	
Длина трубопровода, км	L	120	
Протяженность аварийных участков, км	L_1, L_2	60	
Температура природного газа в трубопроводе, К	$T_{гг}$	281,7	
Давление нагнетания, МПа	$P_{наг}$	7,5	
Давление в конце трубопровода, МПа	$P_{вс}$	5,1	
Производительность газопровода, м ³ ·10 ⁹ /год	Q	30	
Плотность природного газа, кг/м ³	$\rho_{гг}$	0,679	
Время закрытия линейных кранов, сек	$t_{л}$	120	
Показатель адиабаты природного газа	k	1,385	
Расстояние от компрессорной станции (КС) до середины аварийных участков, км	$x_1 = x_2$	10	
<i>Результаты расчета:</i>		первый участок	второй участок
Давление в момент аварии в точке разрыва газопровода, МПа	P_0	6,41	
Масса газа, которая нагнетается в аварийный участок газопровода до момента отсечения, кг	$M_{КС}$	82800,0	
Масса газа, находящаяся в аварийном участке газопровода до аварии, кг	$M_{г}$	4186732,7	4021123,7
Масса газа, истекающего в адиабатическом режиме, кг	$M_{н}$	341744,3	328227,4
Начальный критический массовый расход газа, кг/с	G_0	17774,1	17774,1
Параметр	η_L	0,23	0,22
Постоянная времени, с	ε_L	2038,7	2038,7
Скорость звука в газе до разрыва, м/с	a_0	445,7	445,7
Масса газа, выброшенного из аварийной секции на первом этапе истечения, кг	M_1	448055,2	439980,4
Расход газа на момент закрытия линейного крана, кг/с	$G(t_{л1})$	2821,1	2697,6
Постоянная времени, с	ε_x	138,7	138,7
Расход газа после перекрытия линейного участка ($t - t_{л1} = 60$ сек), кг/с	$G(t)$	1830,3	1750,2
Масса газа, выброшенного из аварийной секции на втором этапе истечения, кг	M_2	391250,9	374129,1
Полная масса газа, кг	M	839306,6	814109,5

Расчет разлета фрагментов грунта и осколков трубы

При разрыве подземного газопровода количество образующихся фрагментов грунта и осколков трубы, их форма и направление полета являются величинами случайными. Принято считать, что направления движения осколков равновероятны, рассеивание осколков по площади зависит только от расстояния от места разрыва газопровода, а зона возможного поражения на поверхности земли имеет форму круга. Согласно методическим указаниям СТО Газпром 2-2.3-351-2009 проведен расчет разлета фрагментов грунта и осколков трубы.

Предполагается, что часть потенциальной энергии сжатого газа расходуется на фрагментацию оболочки трубы и слоя грунта, и приобретение ими начальной скорости. В дальнейшем рассчитывается динамика движения этих фрагментов в воздухе, и определяются размеры зон (на поверхности земли) их разлета.

Закон сохранения энергии на единицу длины траншеи имеет вид:

$$\frac{M_{\text{грунта}} \times v_0}{2} = h \times A_{г} \times M_{г}, \quad (1)$$

где $M_{г}$ – масса сжатого газа для единичной длины газопровода, кг/м; $A_{г}$ – работа расширения единицы массы газа в предположении адиабатического процесса, Дж/кг; $M_{\text{грунта}}$ – масса метаемого грунта, кг/м; v_0 – скорость метаемой массы грунта, м/с.

От общей энергии взрыва конденсированного взрывчатого вещества на образование воронки расходуется значительная часть η энергии взрыва: $\sim 20\%$ – для плотных суглинков и глин, до $30\div 35\%$ – для средних грунтов. В расчетах следует принимать значение (консервативная оценка) $\eta = 0,35$.

Уравнение для $M_{\text{грунта}}$ имеет вид:

$$M_{\text{грунта}} = \rho_{\text{гр}} \times \left((H + DH)^2 \text{tg} j - \rho R_0^2 - (DH - R_0)^2 \text{tg} j \right) \dot{u}, \quad (2)$$

$$DH = \frac{R_0}{\sin j}, \quad (3)$$

$$M_{\text{г}} = \rho_{\text{г,тр}} \times \rho \times R_0^2, \quad (4)$$

$$\rho_{\text{г,тр}} = m_{\text{пр}} \frac{P_{\text{тр}}}{R_{\text{г}} \times T_{\text{пр}} \times Z_c}, \quad (5)$$

где $\rho_{\text{гр}}$ – плотность грунта, кг/м^3 ; $\rho_{\text{г,тр}}$ – плотность природного газа в трубопроводе, кг/м^3 .

Для адиабатического расширения значение удельной потенциальной энергии сжатого газа определяют по формуле:

$$A_{\text{г}} = \frac{DP}{\rho_{\text{г,тр}}(k-1)} \frac{\dot{u}}{\dot{u}} - DP \frac{\dot{u}^{k-1}}{\dot{u}}, \quad (6)$$

$$\Delta P = P_{\text{тр}} - P_c. \quad (7)$$

Из уравнения (1) определяется скорость выбрасываемых фрагментов оболочки трубы, которая по принятому приближению совпадает со скоростью метаемой массой грунта v_0 .

После выброса из траншеи фрагменты трубы и грунта продолжают свое движение в атмосфере. Уравнения движения фрагментов грунта и оболочки трубы в воздухе задаются системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= v, \\ m_0 \frac{dv}{dt} &= -\frac{1}{2} l_{\phi}^2 c_x \rho_{\text{в}} \sqrt{v^2 + w^2} \times v - m_0 g, \\ \frac{dx}{dt} &= w, \\ m_0 \frac{dw}{dt} &= -\frac{1}{2} l_{\phi}^2 c_x \rho_{\text{в}} \sqrt{v^2 + w^2} \times w, \end{aligned} \quad (8)$$

где y, v – вертикальные значения расстояния и скорости; x, w – горизонтальные значения расстояния и скорости; l_{ϕ}, l_x, l_y, l_z – эффективный и характерные размеры фрагмента по трем ортогональным осям; c_x – коэффициент сопротивления фрагмента в воздухе (для плохо обтекаемого тела $c_x = 0,2$); $\rho_{\text{в}}$ – плотность воздуха:

$$l_{\phi} = \sqrt{l_x^2 + l_y^2 + l_z^2}, \quad (9)$$

$$l_x = \delta_{\text{тр}}, \quad (10)$$

$$l_y = \pi \cdot D_0, \quad (11)$$

$$l_z = \frac{L_{\text{разр}}}{n_{\text{оск}}}, \quad (12)$$

где $\delta_{\text{тр}}$ – толщина стенки, м; $n_{\text{оск}}$ – общее количество одинаковых осколков, образующихся при разрушении МГ (рекомендуемое значение $n_{\text{оск}} = 3\div 5$).

Масса фрагмента трубы эффективного размера l_{ϕ} :

$$m_0 = \rho_{\text{тр}} l_{\phi}^3, \quad (13)$$

где $\rho_{\text{тр}}$ – плотность оболочки трубы, кг/м^3 .

Уравнения для скорости системы (8) примут следующий вид:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{c_x \rho_{\text{в}}}{2 l_{\phi}^2 \rho_{\phi}} \sqrt{v^2 + w^2} \times v - g, \quad (14)$$

$$\frac{dw}{dt} = -\frac{c_x \rho_{\text{в}}}{2 l_{\phi}^2 \rho_{\phi}} \sqrt{v^2 + w^2} \times w,$$

где ρ_{ϕ} – плотность фрагмента трубы или грунта, кг/м^3 .

Результаты расчета представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные:				
Давление природного газа в газопроводе, МПа	$P_{гр}$	7,5		
Атмосферное давление, кПа	P_c	101,3		
Диаметр газопровода, мм	D_0	1400		
Толщина стенки газопровода, мм	$\delta_{гр}$	21,5		
Плотность природного газа, кг/м ³	$\rho_{пг}$	0,679		
Плотность грунта, кг/м ³	$\rho_{грунта}$	2000		
Плотность материала оболочки трубы, кг/м ³	$\rho_{тр}$	7800		
Показатель адиабаты природного газа	k	1,385		
Длина разрыва, м	$L_{разр}$	10		
Число осколков	$n_{оск}$			
Расстояние от оси газопровода до поверхности грунта, м	H	1,0		
Результаты расчета:				
	H/R	2,43		
Плотность газа в газопроводе, кг/м ³	$\rho_{г, гр}$	51,93		
Разность давлений, Па	DP	7398700		
Работа расширения, Дж/кг	A_r	462528,75		
	j	30	45	60
	DH	1,40	0,99	0,81
Масса грунта, кг	$M_{грунта}$	9705	11226	13775
Начальная скорость метания грунта (фрагмента трубы), м/с	v_0	58,94	48,02	37,23

Уравнения для скорости движения фрагментов грунта и оболочки трубы в воздухе задаются линейной системой дифференциальных уравнений (14), которая была решена численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка.

На рис. 3-4 представлены найденные графические зависимости вертикальных и горизонтальных составляющих скорости от времени полета фрагмента трубы и грунта при угле раскрытия $\varphi = 30^\circ$.

Зная зависимости составляющих скоростей, численным интегрированием находятся зависимости от времени дальности полета и высоты подъема вылетевшего фрагмента трубы (грунта):

$$\begin{aligned}
 x(t) &= \int_0^t v(t) dt, \\
 y(t) &= \int_0^t v(t) dt.
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Графические зависимости дальности полета, высоты подъема и времени полета фрагмента трубы и грунта при этом же угле раскрытия $\varphi = 30^\circ$ приведены на рис. 5-6.

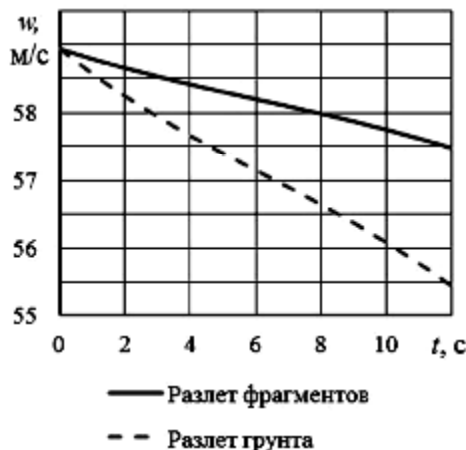


Рис. 3. Зависимость от времени вертикальных составляющих скорости (иллюстрация авторов)

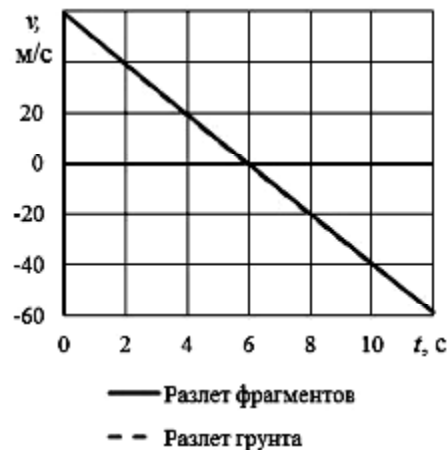


Рис. 4. Зависимость от времени горизонтальных составляющих скорости (иллюстрация авторов)

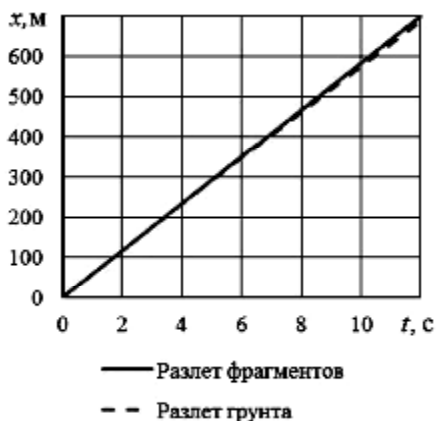


Рис. 5. Зависимость дальности разлета грунта (трубы) от времени (иллюстрация авторов)

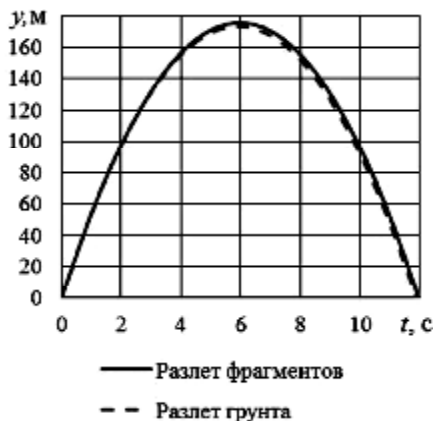


Рис. 6. Зависимость высоты разлета грунта (трубы) от времени (иллюстрация авторов)

Анализируя рис. 3-6 можно сделать следующие выводы:

- по осям x и y скорость имеет линейный характер;
- при начальной скорости метания грунта (фрагмента трубы) $v_0 = 58,94$ м/с примерно за 12 сек. фрагменты грунта (трубы) достигнут поверхности земли;
- за счет высокого давления транспортируемого природного газа и развиваемой скорости, после разрыва, фрагменты грунта (трубы) могут вылететь в атмосферу на достаточно большие расстояния, так по оси x на 700 м и по оси y до 180 м.

Найденные значения позволяют получить пространственное распределение параметров разлета обломков и грунта (дальность, высота и время), что соответственно дает возможность провести оценку последствия ударных воздействий (рис. 7).

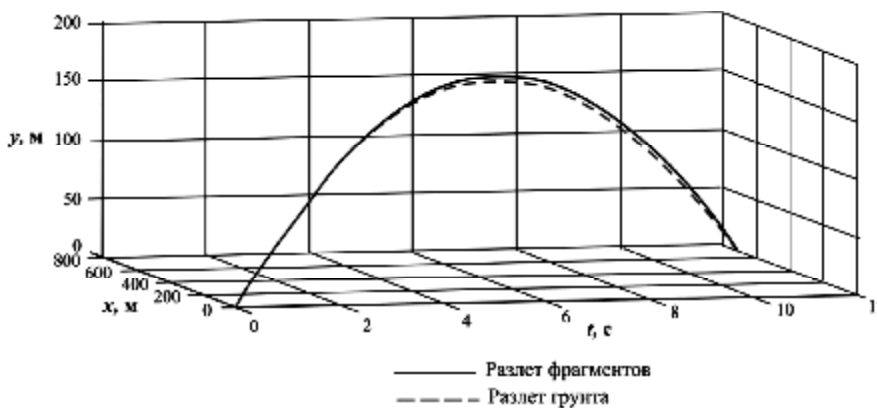


Рис. 7. Траектории разлета обломков и грунта при аварии (иллюстрация авторов)

Таблица 3

p_r	7,5 МПа		
H/R	2,43		
φ	30°	45°	60°
m	Фрагменты грунта		
1 г	171	147	117
1 кг	507	370	242
1 т	679	457	278
	Фрагменты оболочки		
1 г	292	237	174
1 кг	607	423	265
1 т	696	465	281

В табл. 3 приведены расчеты дальности разлета осколков для масс фрагментов от 1 грамма до 1000 кг в предположении, что фрагменты имеют компактную форму (линейные размеры по трем ортогональным осям фрагментов равны).

Заключение

Для принятия обоснованных инженерных и управленческих решений по безопасной эксплуатации газопроводов необходимо знать характеристики транспортируемого природного газа, разбираться в природе поражающих факторов возможной аварии, а инженерные расчеты позволяют проводить экспресс оценки возможной аварийной ситуации.

Список библиографических ссылок

1. Халлыев Н. Х., Усманов Р. Р., Чучкалов М. В., Велиюлин И. И. Методология поддержания, продления и обновления линейной части магистральных газопроводов – основа надежной и безопасной эксплуатации газотранспортной системы // Газовая промышленность. 2017. № 9 (757). С. 34–40.
2. Ямаева Э. Г., Фомина Е. Е. Разработка балльной оценки факторов влияния на безопасную эксплуатацию объектов газораспределения на этапе проектирования // Безопасность жизнедеятельности. 2016. № 1 (181). С. 18–23.
3. Шебеко Ю. Н., Гордиенко Д. М., Пономаренко А. А. и др. Оценка пожарного риска линейной части магистральных трубопроводов // Пожарная безопасность. 2010. № 4. С. 47–58.
4. Барышева О. Б., Садыков Р. А., Батюшков Н. Ю. Оптимизация трассировки газораспределительной сети низкого давления // Современное строительство и архитектура. 2016. № 3 (03). С. 25–28.
5. Рыбаков А. В., Замана К. Ю. Модель оценки зоны возможного поражения от разлета осколков фрагментов оборудования при возникновении чрезвычайных ситуаций техногенного характера на пожаровзрывоопасных объектах // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 4. С. 56–64.
6. Metropolo P., Brown A. Natural gas pipeline accident consequence analysis // Proc. Safety Prog. 2004. 23: doi: 10.1002 / prs.10054. P. 307–310.
7. Сафонов В. С., Ковалев С. А., Овчаров С. В., Мельников А. В. Оценка показателей безопасности и риска перспективных газопроводов высокого давления // Вестник РУДН. Экология и безопасность жизнедеятельности. 2007. № 1. С. 54–62.
8. Rothwell B., Stephens M., Risk analysis of sweet natural gas pipelines: Benchmarking simple consequence models. In 2006 International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2006. P. 911–919.
9. Быков А. И. Определение средней температуры газа на аварийном участке магистрального газопровода // Пожарная безопасность. 2015. Т. 24, № 6. С. 43–50.

Osipova Liliya Eduardovna

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: osipovalilija@mail.ru

Varsegova Evgeniya Vladislavovna

candidate of physical-mathematical sciences, associate professor

E-mail: evarsegova@yandex.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

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

Varsegov Alexander Vladislavovich

engineer

E-mail: alexandervav@mail.ru

OJSC «Gazprom transgaz Kazan»

The organization address: 420073, Russia, Kazan, A. Kutuya st., 41

To the calculation of the distribution of damaging factors of accidents on gas pipelines

Abstract

Problem statement. In the Russian Federation, a unified gas supply system with a pipe diameter of up to 2,6 m, which is subjected to significant internal and external loads during the whole period of operation. Since the main gas pipeline routes are mainly underground, they pass through residential areas, cross roads or other communications, possible accidents with gas emissions followed by fire or explosion can lead to disastrous consequences both for the environment and for the population. The calculation of the intensity of the outflow of emergency gas emissions and the determination of zones of possible dispersion of pipe and soil fragments is necessary in the investigation of the accident and the development of documents related to the safety of operation of pipeline transport, as well as in determining the amount of compensation payments.

Results. For the section of the high pressure gas pipeline with a diameter of $d = 1420$ mm, a working pressure $P_{\text{нар}} = 7,5$ MPa and a length of $L = 120$ km, a graph of the total gas outflow dynamics was calculated (the gas pipeline was guillotine, for a full cross section) and the time for complete emptying was determined. The sizes of zones (on the surface of the earth) of scattering of pipe fragments and soil fragments have been determined.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry is that they allow us to estimate the scale of a possible accident already at the design stage. The found spatial distribution of the scattering parameters of pipe fragments and soil fragments (range, height and time) makes it possible to assess the impact of shock effects.

Keywords: accident, gas pipeline, depressurization, flow rate, shock effect.

References

1. Khallyev N. Kh., Usmanov R. R., Chuchkalov M. V., Veliyulin I. I. Methodology for the maintenance, renewal and renovation of the linear part of main gas pipelines is the foundation of reliable and safe operation of the gas transport system // *Gazovaya promishlennost*. 2017. № 9 (757). P. 34–40.
2. Yamaeva E. G., Fomina E. E. Development of scoring factors influencing the safe operation of the gas distribution in the design phase // *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti*. 2016. № 1 (181). P. 18–23.
3. Shebeko Yu. N., Gordienko D. M., Ponomarenko A. A. Fire risk assessment of the linear part of trunk pipeline // *Pozharnaya bezopasnost*. 2010. № 4. P. 47–58.
4. Barysheva O. B., Sadykov R. A., Batyushkov N. Yu. Optimization of trace in gas distribution network of flow pressure // *Sovremennoe stroitelstvo i arkhitektura*. 2016. № 3 (03). P. 25–28.
5. Rybakov A. V., Zamana K. Yu. The model for assessing the area of possible damage from the fragmentation of fragments of equipment fragments in the event of man-made emergencies at fire and explosion hazard objects // *Nauchnye i obrazovatelnye problem grazhdanskoi zashchity*. 2015. № 4. P. 56–64.
6. Metropolo P., Brown A. Natural gas pipeline accident consequence analysis // *Proc. Safety Prog.* 2004. 23: doi: 10.1002 / prs.10054. P. 307–310.
7. Safonov V. S., Kovalev S. A., Ovcharov S. V., Melnikov A. V. Assessment of safety performance and risk of promising high-pressure gas pipelines // *Vestnik RUDN. Ekologiya i bezopasnost zhiznedeyatelnosti*. 2007. № 1. P. 54–62.
8. Rothwell B., Stephens M. Risk analysis of sweet natural gas pipelines: Benchmarking simple consequence models. In 2006 International Pipeline Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2006. P. 911–919.
9. Bykov A. I. Determination of the average gas temperature in the emergency section of the main pipeline // *Pozharnaya bezopasnost*. 2015. Vol. 24. № 6. P. 43–50.