

УДК 614.833.4

<https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-100-107>

Оценка потенциального риска при истечении газа на надземных участках газопровода с учетом аномальных метеоусловий Севера

ISSN 1812-5220

© Проблемы анализа риска, 2022

Захарова М.И.,

Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН — структурное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН», 677000, Россия, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1

Аннотация

В статье представлена модель оценки потенциального риска утечки газа из надземных участков газопровода при низких температурах.

Обосновано влияние аномальных метеоусловий на величину избыточного давления ударной волны. Оценены безопасные расстояния при взрыве облака газовоздушной смеси метана в условиях температурной инверсии. На основе полученных данных разработана модель оценки потенциального риска.

Ключевые слова: температурная инверсия; рассеивание, частота отказов; ударные волны; потенциальный риск; безопасные расстояния.

Для цитирования: Захарова М.И. Оценка потенциального риска при истечении газа на надземных участках газопровода с учетом аномальных метеоусловий Севера // Проблемы анализа риска. 2022. Т. 19. № 6. С. 100—107, <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-100-107>

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Assessment of Potential Risk During Gas Outflow at Above-Ground Sections of the Gas Pipeline Taking Into Account Abnormal Weather Conditions of the North

Marina I. Zakharova,

V.P. Larionov Institute of the Physical-Technical Problems of the North of the Siberian Branch of the RAS,
Oktyabrskaya str., 1, Yakutsk, 677000, Russia

Abstract

The article presents a model for assessing the potential risk of gas leakage from aboveground sections of the gas pipeline at low temperatures.

The influence of abnormal weather conditions on the magnitude of the excess pressure of the shock wave is substantiated. The safe distances during the explosion of a methane gas-air mixture cloud under conditions of temperature inversion are estimated. Based on the data obtained, a model for assessing potential risk has been developed.

Keywords: temperature inversion; dispersion; failure rate; shock waves; potential risk; safe distances.

For citation: Zakharova M.I. Assessment of potential risk during gas outflow at above-ground sections of the gas pipeline taking into account abnormal weather conditions of the North // Issues of Risk Analysis. 2022;19(6):100-107, (In Russ.), <https://doi.org/10.32686/1812-5220-2022-19-6-100-107>

The author declare no conflict of interest.

Содержание

Введение

1. Дерево отказов утечки газа на надземных участках газопроводов
2. Понятие температурной инверсии и ее влияние на образование облака ГВС метана
3. Модель оценки потенциального риска
4. Оценка безопасных расстояний

Заключение

Литература

Введение

Повышение безопасности населения и территорий от аварийных воздействий техногенного характера является важнейшей задачей во всем мире. Объекты нефтегазовой отрасли, в частности газопроводы, относятся к опасным объектам техносферы, требующим пристального внимания к проблемам надежности и безопасности.

Основным инструментом регулирования уровня опасности является анализ риска, включающий всестороннюю оценку возможных источников опасностей, при реализации которых возможны значительные негативные последствия для человека и окружающей среды.

Специфические условия Севера оказывают определенное влияние на параметры риска, в связи с этим важными становятся исследования в этой области.

Сочетание аномальных условий с застоем воздуха способствует образованию взрывоопасных концентраций газа, а также температурная инверсия влияет на распространение ударных волн, повышая величину избыточного давления за счет фокусировки.

1. Дерево отказов утечки газа на надземных участках газопроводов

Важным параметром при оценке риска является частота возникновения инициирующего события, в данном случае это частота истечения газа из газопровода.

На рис.1 представлено дерево отказов, ведущих к утечке газа, дополненное частотами реализации

отказов, полученных на основе анализа аварий газопроводов.

Из рис. 1 видно, что основными причинами возникновения утечек газа являются неисправности во фланцевых соединениях и механические воздействия третьих лиц.

Частота истечения газа при отказе газопровода составляет $1,13 \cdot 10^{-5}$ 1/(км·год).

При разгерметизации или порыве газопровода возможен выброс значительного количества опасных веществ.

2. Понятие температурной инверсии и ее влияние на образование облака ГВС метана

Температурная инверсия характеризуется повышением температуры с высотой, т.е. положительным температурным градиентом.

В работе [1] проведено исследование влияния температурной инверсии и штиля на концентрацию примесей в воздухе. В результате выявлено, что совместное действие штиля и температурной инверсии является наиболее опасным.

Следовательно, при отсутствии в начальный момент времени источника зажигания будет формироваться газовоздушное облако, которое не рассеивается из-за отсутствия ветра и вертикального турбулентного перемешивания в атмосфере в условиях приземной инверсии.

Частота образования облака ГВС метана λ_{ct} зависит как от частоты истечения газа из газопровода

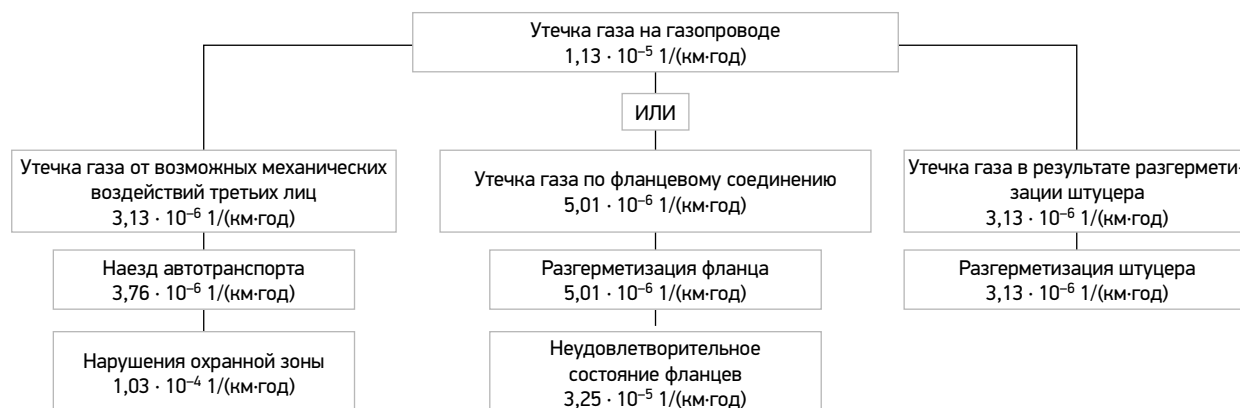


Рис. 1. Дерево отказов утечки газа на надземных участках газопроводов

Figure 1. Gas leak failure tree on above ground sections of gas pipelines

λ_{leak} , так и от вероятности появления опасных метеорологических условий P_{dmc} :

$$\lambda_{cm} = \lambda_{leak} \cdot P_{dmc} \quad (1)$$

На рис. 2 представлены вероятности появления опасных метеорологических условий при низких температурах.

Из рис. 2 видно, что декабрь, январь, февраль являются наиболее опасными, вероятность появления опасных метеорологических условий в среднем составляет 0,87—0,91.

Частота образования облака газозвушной смеси (ГВС) метана представлена в табл. 1.

3. Модель оценки потенциального риска

Рассмотрим понятие потенциального риска. Согласно РБ¹, потенциальный риск — это частота реализации поражающих факторов аварии в рассматриваемой точке территории.

Сценарий аварии при истечении газа из надземного участка газопровода опишем следующим образом: разгерметизация трубопровода с истечением газа → образование облака ГВС метана → взрыв при наличии источника зажигания → поражение рецепиентов.

Таким образом, оценку потенциального риска можем определить по следующей формуле:

$$R_{pot} = \lambda_{leak} \cdot P_{dmc} \cdot P_f \quad (2)$$

где λ_{leak} — частота истечения газа из надземного участка газопровода, 1/(км · год);

P_{dmc} — вероятность появления опасных метеорологических условий в условиях Севера;

P_f — вероятность появления источника зажигания.

Наиболее вероятными причинами появления источника зажигания являются:

- электрическая искра при коротком замыкании;
- искры при огневых работах;
- несоблюдение режима курения.

¹ Руководство по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29.06.2016.

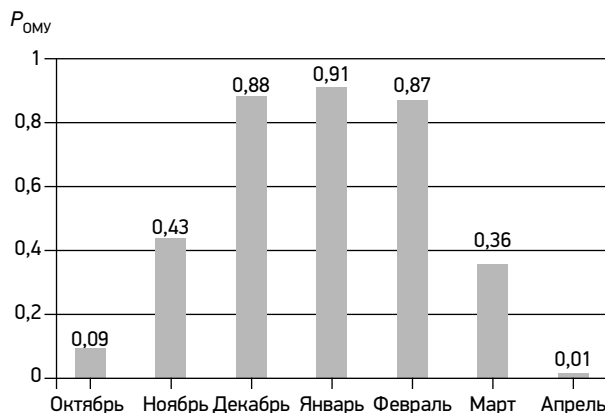


Рис. 2. Вероятности появления опасных метеорологических условий при низких температурах

Figure 2. Probability of occurrence of hazardous meteorological conditions at low temperatures

Таблица 1. Частота образования облака ГВС метана

Table 1. Cloud formation frequencies of explosive gas-air mixture of methane

Месяц	Частота образования облака ГВС метана, 1/(км·год)
Октябрь	$1,02 \cdot 10^{-6}$
Ноябрь	$4,86 \cdot 10^{-6}$
Декабрь	$9,94 \cdot 10^{-6}$
Январь	$1,03 \cdot 10^{-5}$
Февраль	$9,83 \cdot 10^{-6}$
Март	$4,07 \cdot 10^{-6}$
Апрель	$1,13 \cdot 10^{-7}$

На появление источника зажигания существенное влияние оказывают нарушения охранной зоны, а также нормативных расстояний до газопровода.

Таким образом, модель оценки потенциального риска примет следующий вид:

$$R_{pot} = \lambda_{leak} \cdot P_f \cdot \begin{cases} P_{dmc} = 0,87 \dots 0,91 \text{ (декабрь, январь, февраль)} \\ P_{dmc} = 0,36 \dots 0,43 \text{ (ноябрь, март)} \\ P_{dmc} = 0,01 \dots 0,09 \text{ (апрель, октябрь)} \\ P_{dmc} = 0 \text{ (май — сентябрь)} \end{cases} \quad (3)$$

где λ_{leak} — частота истечения газа на надземном участке газопровода;

P_f — вероятность появления источника зажигания;

P_{dmc} — вероятность появления опасных метеорологических условий в условиях Севера.

Результаты оценки потенциального риска при вероятности появления источника зажигания равной 1 представлены в табл. 2.

Таблица 2. Оценка потенциального риска с учетом аномальных условий Севера

Table 2. Assessment of potential risk taking into account abnormal conditions of the North

Месяц	Потенциальный риск, 1/(км·год)
Октябрь	$1,02 \cdot 10^{-6}$
Ноябрь	$4,86 \cdot 10^{-6}$
Декабрь	$9,94 \cdot 10^{-6}$
Январь	$1,03 \cdot 10^{-5}$
Февраль	$9,83 \cdot 10^{-6}$
Март	$4,07 \cdot 10^{-6}$
Апрель	$1,13 \cdot 10^{-7}$

4. Оценка безопасных расстояний

Наиболее опасными поражающими факторами при взрыве облака метана являются воздушные ударные волны, которые распространяются на значительные расстояния и могут привести к катастрофическим последствиям.

На рис. 3 представлено изменение избыточного давления воздушной ударной волны при удалении от центра взрыва газовоздушной смеси массой газа 10 т, оцененное по методике².

При отдалении от центра избыточное давление воздушной ударной волны постепенно уменьшается.

Однако в условиях Севера, начиная с определенных расстояний, возрастает влияние погодных условий на интенсивность воздушных ударных волн.

Слабыми воздушными ударными волнами считаем волны с избыточным давлением до 10 кПа [2].

Взрыв облака газовоздушной смеси метана является дефлаграционным. При дефлаграционных взрывах скорость дефлаграции не превышает 150 м/с, а избыточное давление воздушной ударной волны не более 30 кПа [3].

Рассмотрим два случая распространения воздушных ударных волн в зависимости от изменения температуры с высотой.

В первом случае температура понижается с увеличением высоты. Этот случай изменения

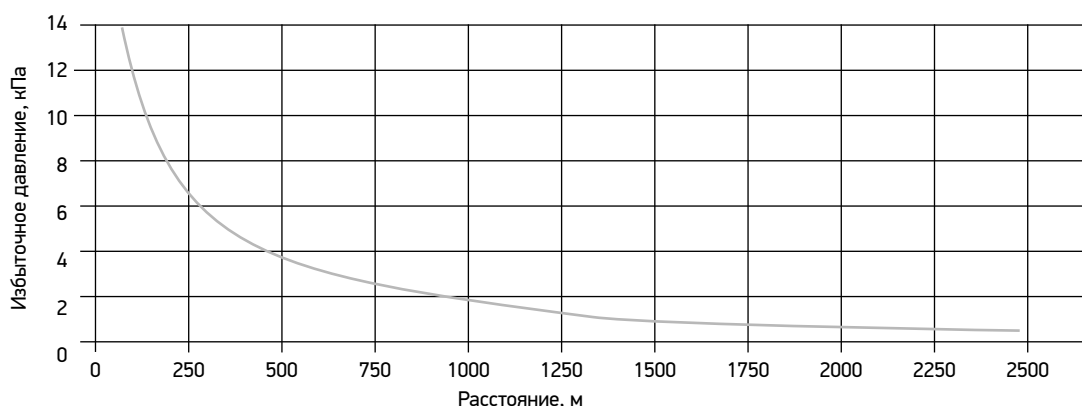


Рис. 3. Изменение избыточного давления воздушной ударной волны при удалении от центра взрыва газовоздушной смеси, оцененное по методике²

Figure 3. Change of overpressure at the shock wave when moving away from the center of the explosion of the gas — air mixture estimated by the method²

² Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31.03.2016.

температуры по высоте является нормальным, и распространение воздушной ударной волны происходит вверх, лучи не преломляются к земле и не отражаются от нее (рис. 4).

Во втором случае, аномальном, температура воздуха повышается с высотой, т.е. имеет место случай положительного температурного градиента или температурной инверсии. Увеличение температуры в инверсионном слое может колебаться от десятых долей градуса до 20 °С и более. При положительном температурном градиенте происходит отклонение воздушных ударных волн обратно к земле и фокусировка взрывных волн.

Схематично это показано на рис. 5.

Сложение волн в точке прихода ведет к увеличению давления в фазе сжатия.

Эффект фокусировки происходит на некотором расстоянии от источника взрыва; повреждения, как правило, не наблюдаются на расстоянии меньше 1000 м [2].

В качестве примера рассмотрим рис. 3, где на расстоянии 1000 м величина избыточного давления достигает значения 2 кПа.

В связи с этим для оценки увеличения избыточного давления примем значение воздушной ударной волны равное 2 кПа (безопасное для человека).

Результаты оценки избыточного давления в зависимости от характера инверсии представлены в табл. 3.

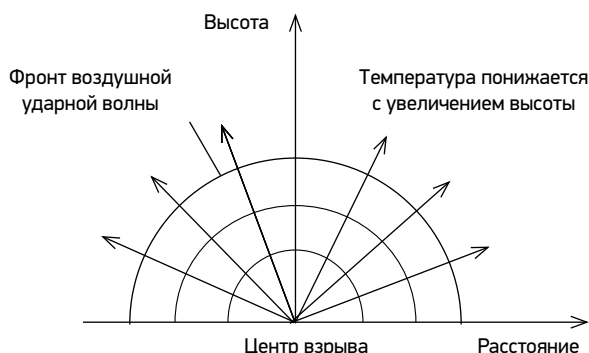


Рис. 4. Распространение воздушной ударной волны при отрицательном градиенте температур

Figure 4. Shock wave propagation at negative temperature gradient

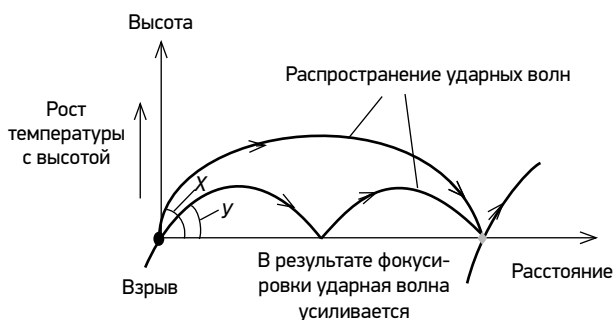


Рис. 5. Эффект фокусировки воздушных ударных волн при температурной инверсии

Figure 5. Effect of focusing shock waves at temperature inversion

Таблица 3. Результаты оценки избыточного давления в зависимости от характера инверсии

Table 3. The results of the excess pressure assessment depending on the nature of the inversion

Характер инверсии	Характер изменения скорости распространения ударной волны	K_m [2]	Δp , кПа	Степень поражения	
				С [3]	П [3]
Положительный градиент около земли и отрицательный на высоте		5	10	Полное разрушение застекления	Безопасно для человека
Нулевой градиент около земли и положительный на высоте		10	20	Разрушение наименее прочных конструкций	Легкое поражение
Слабый положительный градиент около поверхности с сильно положительным градиентом вверх		25	50	Средние повреждения	Среднее поражение

где K_m — коэффициент возможного увеличения избыточного давления Δp ударной волны; С — повреждение сооружений; П — поражение человека.

Таким образом, для оценки избыточного давления можем смоделировать следующее.

На расстояниях до 1000 м избыточное давление Δp рассчитывается по методике³:

$$\Delta p = \begin{cases} p_a \cdot \left(\frac{V_{\Gamma}^2}{\omega_0^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_H - 1}{\sigma_H} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{\Gamma_{кр}} - \frac{0,14}{\Gamma_{кр}^2} \right) & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) < \Gamma_{кр} \\ p_a \cdot p_{x1}(\Gamma) \cdot p_0 & \text{if } \Gamma_x(\Gamma) \geq \Gamma_{кр} \end{cases} \quad (4)$$

$$\Gamma_{кр} = 0,34$$

$$p_{x1}(\Gamma) = \left(\frac{V_{\Gamma}^2}{\omega_0^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_H - 1}{\sigma_H} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{\Gamma_x(\Gamma)} - \frac{0,14}{\Gamma_x(\Gamma)^2} \right)$$

$$\Gamma_x(\Gamma) = \frac{\Gamma}{\left(10 \cdot \frac{E}{p_0} \right)^{\frac{1}{3}}}, \quad (5)$$

$$E = 2 \cdot M_{\Gamma} \cdot q \cdot \frac{C_{ст}}{C_{\Gamma}}$$

где Δp — избыточное давление ударной волны, кПа; C_{Γ} — концентрация газа в смеси, % об; $C_{ст}$ — стехиометрическая концентрация, % об; M_{Γ} — масса газа, кг; V_{Γ} — скорость фронта пламени, м/с; ω_0 — скорость звука в воздухе, м/с; Γ — расстояние от центра облака, м; q — теплота сгорания, МДж/кг; σ_H — степень расширения продуктов сгорания; E — эффективный энергозапас горючей смеси, МДж; $\Gamma_x(\Gamma)$ — безразмерный радиус; p_0 — атмосферное давление, атм; p_a — атмосферное давление, кПа.

На расстояниях свыше 1000 м избыточное давление Δp_{inv} рассчитываем как:

$$\Delta p_{inv} = K_M \cdot \Delta p, \quad (6)$$

где K_M — коэффициент возможного увеличения избыточного давления при наличии температурной инверсии.

³ Руководство по безопасности «Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей». Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 31.03.2016.

Далее, подставляя в формулу (6) формулу (4), получим:

$$\Delta p_{inv} = K_M \cdot p_a \cdot p_0 \cdot \left(\frac{V_{\Gamma}^2}{\omega_0^2} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_H - 1}{\sigma_H} \right) \cdot \left(\frac{0,83}{\Gamma_x(\Gamma)} - \frac{0,14}{\Gamma_x(\Gamma)^2} \right). \quad (7)$$

Из формулы (7) можем определить безопасные расстояния в зависимости от массы газа и характера инверсии.

$$\begin{cases} \Gamma = \frac{K_M \cdot (0,83 + \sqrt{D})}{2 \cdot \Delta p_{inv} \cdot C} \cdot \left(10 \cdot \frac{E}{p_0} \right)^{\frac{1}{3}} \\ C = \frac{\omega_0^2 \cdot \sigma_H}{p_a \cdot p_0 \cdot (v_{\Gamma}^2) \cdot (\sigma_H - 1)} \\ D = 0,83^2 - 0,56 \cdot \frac{\Delta p_{inv} \cdot C}{K_M} \\ E = 2 \cdot M_{\Gamma} \cdot q \cdot \frac{C_{ст}}{C_{\Gamma}} \\ \Delta p_{inv} = K_M \cdot \Delta p \end{cases}. \quad (8)$$

Значение избыточного давления менее 10 кПа является относительно безопасным для человека [3]. Таким образом, оценим расстояния, при которых значение избыточного давления уменьшается до 10 кПа.

Результаты оценки безопасных расстояний в зависимости от характера инверсии и массы газа в открытой местности приведены в табл. 4.

Заключение

На основе полученных данных разработана модель оценки потенциального риска и его зоны действия при взрыве ГВС метана в открытом незагроможденном пространстве при истечении газа на надземных участках газопровода с учетом аномальных метеорологических условий Севера.

$$R_{pot} = \lambda_{leak} \cdot P_f \cdot \begin{cases} P_{dmc} = 0,87 \dots 0,91 \text{ (декабрь, январь, февраль)} \\ P_{dmc} = 0,36 \dots 0,43 \text{ (ноябрь, март)} \\ P_{dmc} = 0,01 \dots 0,09 \text{ (апрель, октябрь)} \\ P_{dmc} = 0 \text{ (май — сентябрь)} \end{cases}.$$

Таблица 4. Безопасные расстояния в зависимости от массы газа и характера инверсии на открытой незагроможденной местности*Table 4. Safe distances depending on gas weight and inversion nature in open, uncluttered terrain*

Масса газа, кг	Безопасные расстояния, м							
	10 000	8000	6000	4000	2000	1000	800	600
$K_M = 1$	150	140	127	111	88	70	65	59
$K_M = 5$	150	140	127	111	88	70	65	59
$K_M = 10$	1952	1812	1646	1438	1141	70	65	59
$K_M = 25$	4939	4585	4166	3639	2888	2292	2128	1934

где K_M — коэффициент возможного увеличения избыточного давления Δp ударной волны.

1. При $\Gamma < 1000$ м Δp рассчитываем по методике².

2. При $\Gamma \geq 1000$ м $\Delta p = \Delta p_{inv}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \Gamma = \frac{K_M (0,83 + \sqrt{D})}{2 \cdot \Delta p_{inv} \cdot C} \cdot \left(10 \cdot \frac{E}{p_0} \right)^{\frac{1}{3}} \\ C = \frac{w_0^2 \cdot \sigma_H}{p_a \cdot p_0 \cdot (v_r^2) \cdot (\sigma_H - 1)} \\ D = 0,83^2 - 0,56 \cdot \frac{\Delta p_{inv} \cdot C}{K_M} \\ E = 2 \cdot M_\Gamma \cdot q \cdot \frac{C_{cr}}{C_r} \\ \Delta p_{inv} = K_M \cdot \Delta p \end{array} \right.$$

3. Козлитин А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. Саратов: СГТУ, 2002. 180 с. [Kozlitin A.M. Theoretical basis and practice of technogenic risk analysis. Probabilistic methods for quantitative assessment of technosphere hazards / A.M. Kozlitin, A.I. Popov, P.A. Kozlitin. Saratov: SGTU, 2002. 180 p., (In Russ.)]

Сведения об авторе

Захарова Марина Ивановна: кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН — структурное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»

Количество публикаций: 46

Область научных интересов: анализ риска

ResearcherID: K-3079-2018

Scopus Author ID: 56388537300

ORCID: 0000-0002-6568-3696

Контактная информация:

Адрес: 677000, г. Якутск, ул. Октябрьская, д. 1, marine3@yandex.ru

Литература [References]

1. Сонькин Л.Р. Некоторые возможности прогноза содержания примесей в городском воздухе // Труды ГГО. 1971. № 254. С. 121—131. [Son'kin L.R. Some possibilities for predicting the content of impurities in urban air // Trudy GGO. 1971;(254):121—131, (In Russ.)]
2. Цейтлин Я.И. Сейсмические и ударные воздушные волны промышленных взрывов / Я.И. Цейтлин, Н.И. Смолий. М.: Недра, 1981. 192 с. [Cejtlin Ya.I. Seismic and shock air waves of industrial explosions / Ya.I. Cejtlin, N.I. Smolij. M.: Nedra, 1981. 192 p., (In Russ.)]

Статья поступила в редакцию: 21.06.2022

После доработки: 19.09.2022

Одобрена после рецензирования: 18.10.2022

Принята к публикации: 21.10.2022

Дата публикации: 29.12.2022

The article was submitted: 21.06.2022

Received after reworking: 19.09.2022

Approved after reviewing: 18.10.2022

Accepted for publication: 21.10.2022

Date of publication: 29.12.2022