

9. Гончаревич И.Ф., Тиль Б. Асимметричные колебания – средство повышения эффективности вибрационных технологических процессов // XXI век. - 2005. - №5. – С. 46-54

10. Goncharevich I.F., Frolov K.V. Theory of Vibratory Technology. – New York, Washington, Filadelpia, London? Hemisphere Publishing Corporation. - 1990/ - 540 p.

11. Спиваковский А.О., Гончаревич И.Ф. Вибрационные и волновые машины. – М.:Наука. - 1985. – 288 с.

12. Гончаревич И.Ф., Гудушаури Э.Г. Защита от вибрационных воздействий человека-оператора и повышение эффективности технологического оборудования методами вибрационной техники.// Проблемы машиностроения и автоматизации - № 3, 2012.

13. Гончаревич И.Ф., Гудушаури Э.Г., Мельников А.М., Щеглов С.В. О перспективах использования вибрационной техники и технологии в сельском хозяйстве. Сборник докладов XI Международной научно-практической конференции 14-15 сентября 2010 г., г. Углич

### **Сведения об авторе**

*Гудушаури Элгуджа Георгиевч*, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки. Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (ИМАШ РАН), тел. (495) 623-50-97, mibsts@mail.ru

УДК 331.461

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ АВАРИЙ НА ОБЪЕКТАХ НЕФТЕГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ**

**Канд. техн. наук *М.И. Захарова***

**Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН – структурное подразделение ФИЦ «Якутский научный центр СО РАН»**

*В условиях сурового климата Арктики вероятность аварийных ситуаций возрастает и решение задач, связанных с прогнозированием последствий аварий на объектах нефтегазовой промышленности, приобретает все большее значение. Представлены результаты анализа риска аварий резервуаров и газопроводов в условиях Арктики.*

**Ключевые слова:** анализ риска, разлив нефтепродуктов, истечение газа, температурная инверсия, рассеивание, частота аварийных сценариев, ударные волны, тепловое излучение.

## **PREDICTION OF THE CONSEQUENCES OF ACCIDENTS AT OIL AND GAS OBJECTS IN THE ARCTIC**

**Ph.D. (Tech.) *M.I. Zakharova***

**The Institution of Russian Academy of Sciences the V.P. Larionov's Institute of Physical-Technical Problems of the North, Siberian Branch of the RAS**

*Under the severe climate of the Arctic, the probability of emergency situations increases and the solution of problems related to forecasting the consequences of accidents at oil and gas industry objects becomes increasingly important. The article presents the results of the risk analysis of reservoir and gas pipeline accidents in the Arctic.*

**Keywords:** risk analysis, oil spill, gas expiration, temperature inversion, dispersion, frequency of emergency scenarios, shock waves, thermal radiation.

В Сибирском районе Арктики зимой развивается Антициклоническая циркуляция. В этих районах отмечаются очень низкие температуры воздуха, небольшая облачность, незначительное количество осадков и слабые или умеренные ветры. Средние температуры самого холодного зимнего месяца - января до  $-45...-50$  °С. Минимальные температуры в этих районах иногда снижаются до  $-55...-60$  °С. В результате сильного выхолаживания поверхности в этих районах постоянны инверсии температуры воздуха [1].

Для элементов технических систем, эксплуатируемых в условиях Севера, определяющим внешним фактором являются низкие температуры атмосферного воздуха, которые ухудшают основные физико-механические свойства конструкционных материалов, повышают их склонность к хрупкому разрушению как потенциальному источнику возможной аварии [2, 3].

Неконтролируемое развитие аварийных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса может привести к значительным разрушениям и к гибели людей.

Анализ разрушений резервуаров [4] показывает, что предельное состояние сооружения определяется как хрупкое разрушение, имеющее внезапный характер и происходящее при низкой температуре. Аварии сопровождаются выбросом значительного количества нефтепродуктов, которые представляют серьезную экологическую опасность.

Специфической особенностью арктических регионов является наличие вечной мерзлоты. При разливах нефть проникает вглубь до зоны оттаивания и продолжает распространяться латерально над этой зоной, подвергаясь очень медленной трансформации [5]. Продолжительность самовосстановления почвы при среднем уровне загрязнения в условиях Севера оценивается разными исследователями от 10 до 15 лет [6].

Решение проблемы реабилитации нарушенных экосистем должно опираться на комплексный подход с проведением экологического мониторинга загрязнений водных бассейнов, почвогрунтов, донных осадков, разработкой на его основе интегрированных технологий реабилитации и контролем их эффективности и качества очистки [7].

Основная опасность резервуаров, приводящая к катастрофическим последствиям с большим материальным ущербом и гибелью людей, связана с возможностью взрыва и пожара.

В результате реализации опасности на промышленном объекте образуются поражающие факторы для населения, персонала, окружающей среды и самого объекта.

Оценка зон действия поражающих факторов базируется на разработке математических моделей, определения параметров как самих поражающих факторов аварий, так предшествующих к возникновению поражающих факторов явлений.

На этом этапе производится расчет размеров зон поражения, определяются возможные опасные факторы аварии и их интенсивность, дистанции, на которые распространяются влияние опасных поражающих факторов, а также возможные пути развития аварийной ситуации после осуществления любого иницирующего события.

По результатам анализа известных аварий со взрывом резервуаров, произошедших при отрицательных температурах окружающей среды с 1982 г. по 2011 г., выявлены основные причины взрыва резервуаров [8].

Основными причинами аварий со взрывом резервуаров являются: термическое воздействие соседних резервуаров, составляет 18,18 % от общего числа аварий; воздействие статического электричества – 9,09 %; нарушение правил технической и пожарной безопасности – 45,46 %; диверсия – 9,09 %; воздействие резкого колебания температуры – 9,09 %; взрыв соседнего оборудования – 9,09 %.

По результатам статистического анализа наиболее частой причиной взрыва резервуаров с нефтепродуктами является нарушение правил технической и пожарной безопасности.

При наиболее опасном сценарии аварии резервуаров происходит растекание горящего нефтепродукта по территории объекта, поражающим фактором является термическое воздействие от пожара.

Пожар разлития характеризуется выделением большого количества тепла, способного вызывать не только поражение людей, но и воспламенение соседних объектов, в том числе резервуаров с нефтепродуктами, что может сопровождаться взрывом.

Интенсивность теплового излучения  $q(r)$  при пожаре разлития нефтепродуктов на расстоянии  $r$  от центра пожара вычисляем по формуле [9]:

$$q(r) = E \cdot F_{\Sigma}(r) \cdot \lambda(r), \quad (1)$$

где  $q(r)$  – интенсивность теплового излучения на расстоянии  $r$ , кВт/м<sup>2</sup>;  $E$  – среднеповерхностная интенсивность излучения пламени, кВт/м<sup>2</sup>;  $F_{\Sigma}(r)$  – угловой коэффициент облученности;  $\lambda(r)$  – коэффициент пропускания атмосферы;  $r$  – расстояние от геометрического центра пламени до мишени, м.

Значение  $E$  принимается на основе имеющихся экспериментальных данных [10].

Угловой коэффициент  $F_{\Sigma}(r)$ , являющийся геометрической характеристикой теплообмена излучением системы тел в непоглощающей среде, в общем случае определяется уравнением [8]:

$$F_{\Sigma}(r) = \int_{F_1} dF_1 \int_{F_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{\pi \cdot r^2} \cdot dF_2, \quad (2)$$

где  $F_1, F_2$  – площади облучающего (пламени) и облучаемого (мишени) тел системы, м<sup>2</sup>;  $\beta_1, \beta_2$  – соответствующие углы между нормалью к одной площадке и направлением на другую, град.

При определении коэффициента пропускания атмосферы  $\lambda(r)$  в условиях Севера, следует учесть температуру окружающей среды, так как с уменьшением температуры окружающей среды коэффициент пропускания атмосферы увеличивается, вместе с ним увеличивается значение интенсивности теплового излучения.

Рассмотрим влияние температуры окружающей среды на коэффициент пропускания атмосферы  $\lambda(r)$ .

Для исследования влияния температуры окружающей среды на коэффициент пропускания атмосферы используем формулу Симпсона IC [11]:

$$\lambda(r) = 1,5092 - 0,0708 \cdot \ln[r \cdot p_{mnp}(T_a) \cdot RH/100] \quad (3)$$

где  $p_{mnp}(T_a)$  – давление насыщенного водяного пара, Па;  $T_a$  – температура атмосферы, °С;  $RH$  – относительная влажность воздуха, %.

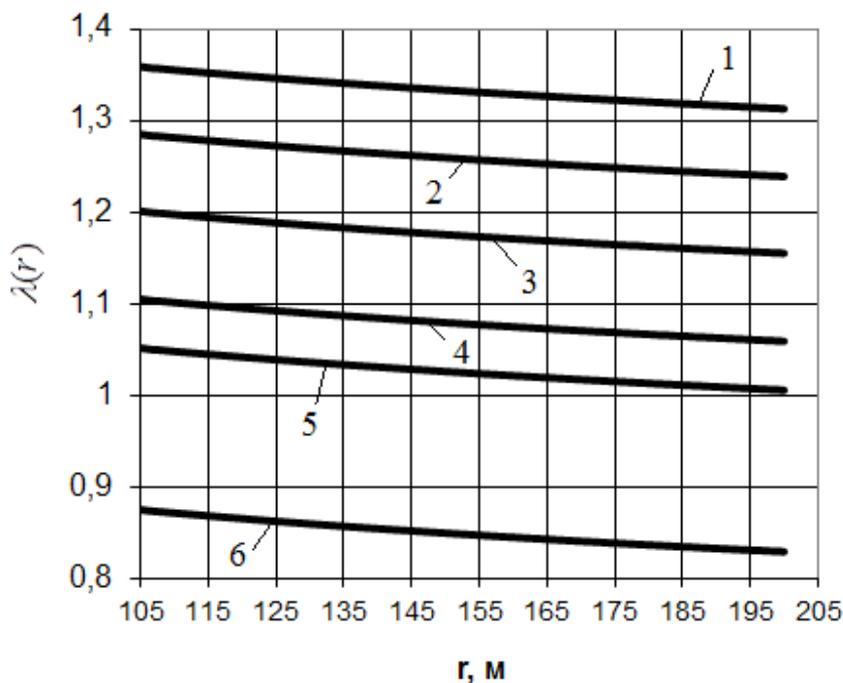
При этом для оценки давления насыщенного водяного пара  $p_{нвр}(T_a)$  при низких температурах применим формулу, предлагаемую в работе Тарабанова М.Г. [12] при температурах атмосферной среды от - 60 до 0 °С:

$$p_{нвр}(T_a) = \exp \frac{18,74 \cdot T_a - 115,72}{233,77 + 0,881 \cdot T_a}, \quad (4)$$

Также в работе Тарабанова М.Г. предложена формула оценки давления насыщенного водяного пара  $p_{нвр}(T_a)$  при температурах от 0 до + 83 °С, которая определяется по следующей формуле:

$$p_{нвр}(T_a) = \exp \frac{16,57 \cdot T_a - 115,72}{233,77 + 0,997 \cdot T_a}, \quad (5)$$

Используя формулы (3), (4) и (5), оценим коэффициент пропускания атмосферы  $\lambda(r)$  при различных температурах окружающей среды. Графики зависимостей коэффициента пропускания атмосферы  $\lambda(r)$  от расстояния приведены на рис. 1.



- 1 - при температуре окружающей среды = -70 °С (203 К),  $\gamma = 1$
- 2 - при температуре окружающей среды = -50 °С (223 К),  $\gamma = 1$
- 3 - при температуре окружающей среды = -30 °С (243 К),  $\gamma = 1$
- 4 - при температуре окружающей среды = -10 °С (263 К),  $\gamma = 1$
- 5 - при температуре окружающей среды = 0 °С (273 К),  $\gamma = 1$
- 6 - при температуре окружающей среды = 40 °С (313 К),  $\gamma = 1$

Рис. 1. Графики зависимостей коэффициента пропускания атмосферы  $\lambda(r)$  от расстояния  $r$  при различных температурах окружающей среды

Из рис. 1 видно, что при снижении температуры окружающей среды увеличивается коэффициент пропускания атмосферы, следовательно, увеличивается и интенсивность теплового излучения.

Оценим безопасные расстояния для человека по формулам (1 - 3) и (4) при температуре  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и для сравнения при температуре  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  по формулам (1 - 3) и (5).

Графики результатов оценки безопасных расстояний для человека при температуре окружающей среды  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$  для вертикальных резервуаров представлены на рис. 2 [13].

В безопасных расстояниях для человека интенсивность теплового излучения достигает значения  $1,4\text{ кВт/м}^2$ .

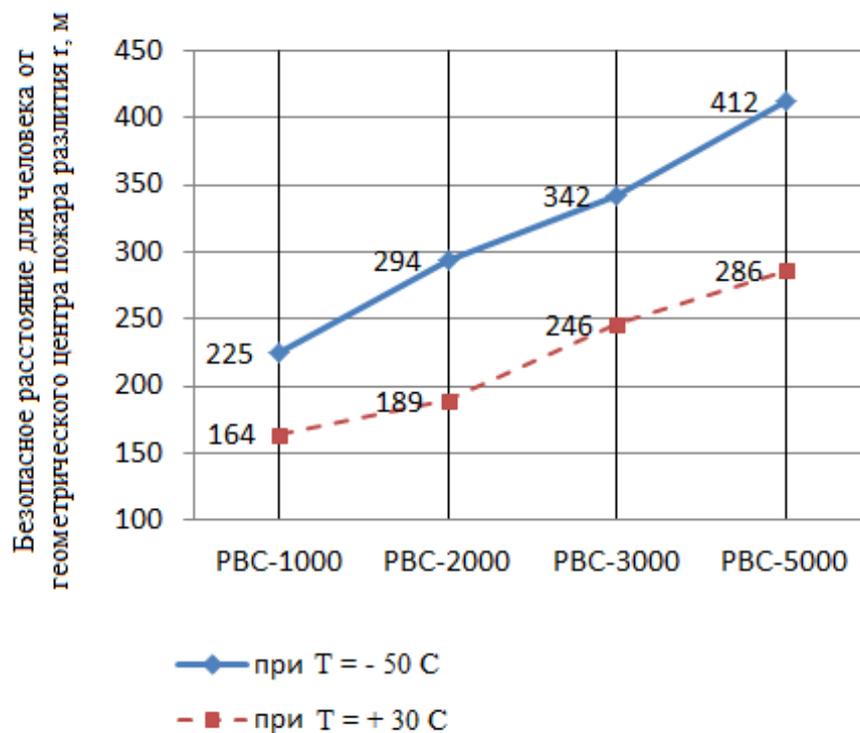


Рис. 2. Результаты оценки безопасных расстояний для человека при реализации сценария 4 на вертикальных резервуарах PBC-1000, 2000, 3000, 5000 при температурах окружающей среды  $+30$  и  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$

По результатам оценки безопасных расстояний для человека при реализации наиболее опасного сценария на вертикальных резервуарах с нефтепродуктом выявлено, что при снижении температуры окружающей среды от  $+30$  до  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  безопасное расстояние от источника пожара отдалится от 60 до 130 метров в зависимости от объема разлившегося нефтепродукта. Так как безопасное расстояние от источника пожара изменяется в сторону увеличения, то при оценках безопасных расстояний необходимо учитывать температуру окружающей среды [13].

Определенный интерес представляет анализ аварий газопроводов, работающих при низких температурах окружающей среды. Такие условия значительно осложняют эксплуатацию газопровода, как в части поддержания технологических режимов транспорта

газа, так и в части контроля состояния линейной части, что увеличивает риск аварийной разгерметизации трубопровода.

По результатам анализа аварий газопроводов при низких температурах установлены их основные причины и вероятности  $P$  возникновения: трещина в газопроводе,  $P = 0,09$ ; коррозия,  $0,27$ ; износ трубы,  $0,18$ ; деформации трубы в результате усталости металла и перепада температур, по  $0,09$ ; отказ задвижки, разрушение шарового крана, разгерметизация стыка между изолирующим фланцевым соединением и фланцем подводящего газопровода,  $0,14$ ; повреждение трубы,  $0,14$  [14].

В Сибирском районе Арктики при низких температурах воздуха учитываются аномальные условия, определяемые образованием мощных продолжительных температурных инверсий в сочетании со штилем. Эти аномальные условия затрудняют рассеяние газа в атмосфере, и приводят к его скоплению до опасных концентраций, при наличии источника возгорания газоздушная смесь может воспламениться и произойти взрыв [15].

По результатам анализа и систематизации статистических метеоданных с 1997 по 2016 г. получены вероятности появления опасных метеоусловий по месяцам в зимнее время в п. Оймякон, рис. 3 [16].

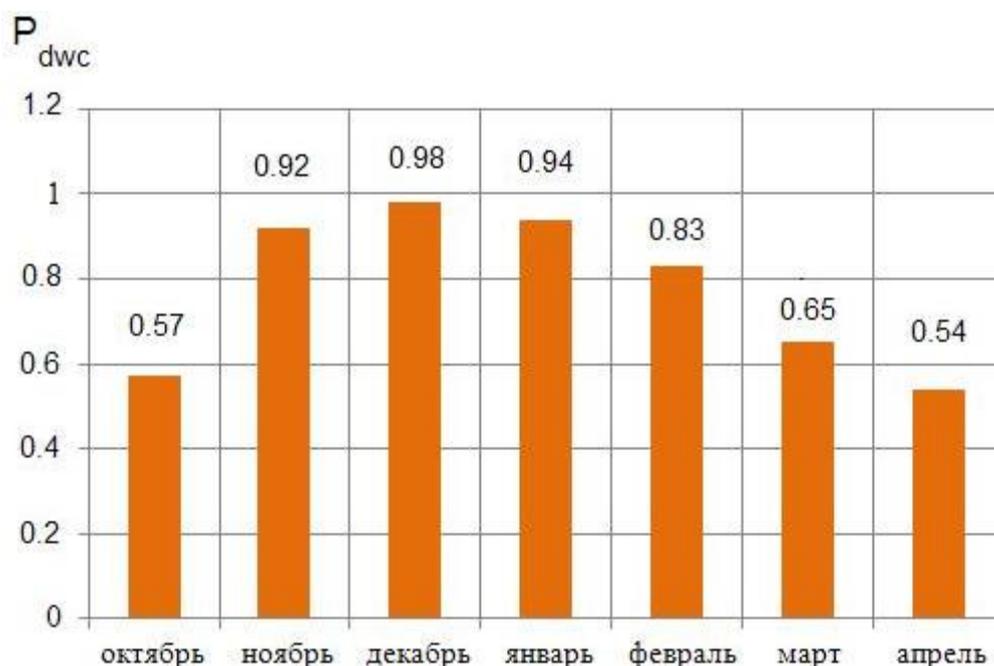


Рис. 3. Вероятности появления опасных метеорологических условий по месяцам в зимнее время в п. Оймякон

Из рис. 3 видно, что в зимний период наибольшая вероятность появления опасных метеорологических условий наблюдается в декабре месяце. Наиболее опасными периодами являются ноябрь, декабрь, январь месяцы, где вероятность образования инверсии со штилем в среднем составляет  $0.95$ .

По результатам анализа известных аварий газопроводов, произошедших при низких температурах, разработано “дерево событий” истечения газа из газопровода с оценкой частот реализации аварийных сценариев, предназначенных для количественной оценки риска, рис. 4 [17].

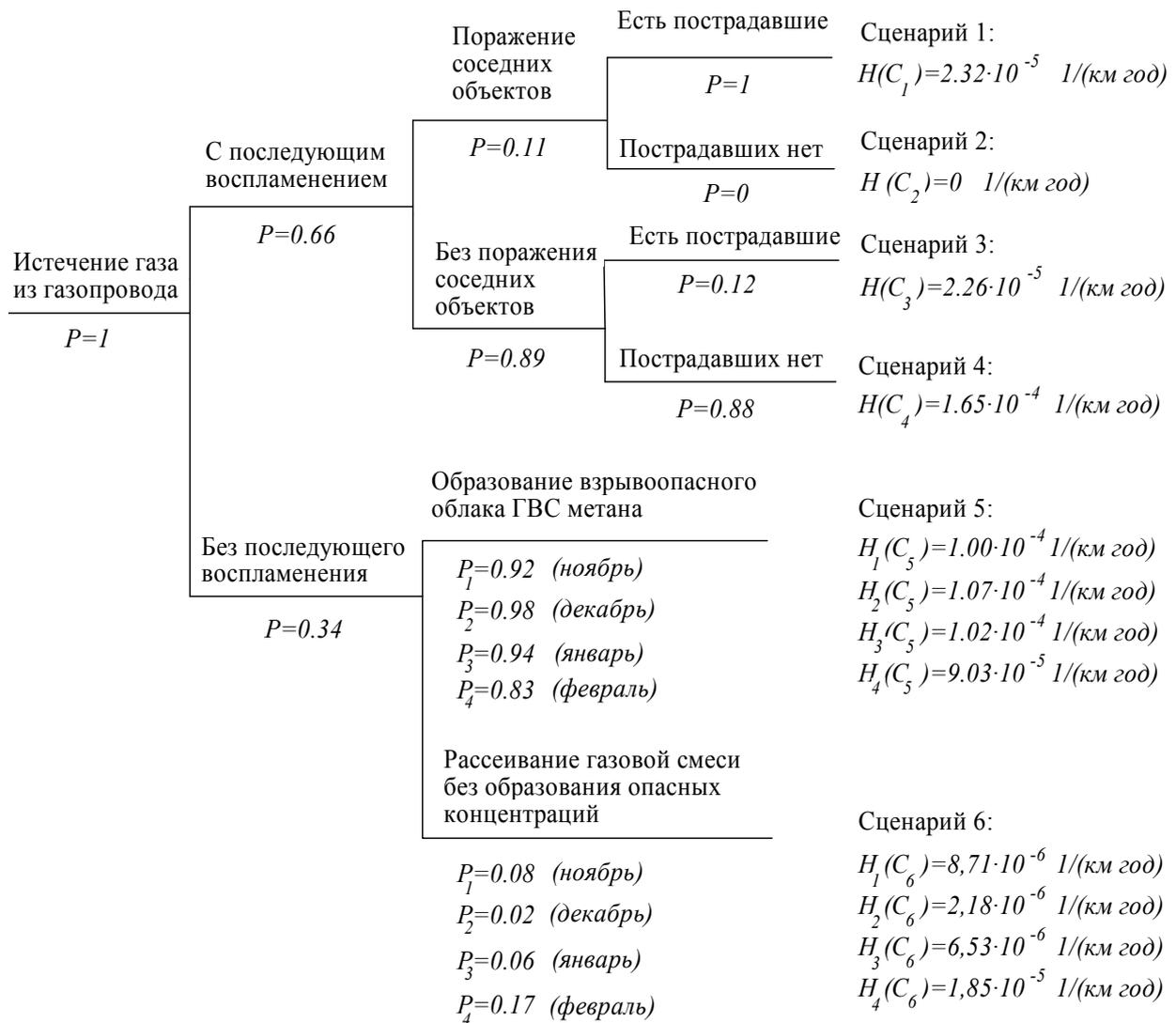


Рис. 4. “Дерево событий” истечения газа из газопровода при низких температурах окружающей среды

Условная вероятность возникновения инициирующего события – истечения газа, принималась равной 1. Относительные вероятности развития аварийных ситуаций определены по анализу статистических данных аварий газопроводов при минусовых температурах окружающей среды и по вероятности наступления опасных метеоусловий.

К одним из наиболее опасных поражающих факторов при аварии газопроводов следует отнести не только тепловое излучение (при пожаре), но и ударную волну при взрыве облака газоздушнoй смеси (ГВС) метана на открытой местности.

При оценке параметров дефлаграционного взрыва облака метана на дальних расстояниях в условиях Севера следует учитывать влияние мощных температурных инверсий на волны с избыточным давлением не более 200 Па.

Изучению влияния инверсии на возможность увеличения слабых воздушных волн при взрывных работах посвящены труды следующих авторов - Цейтлин Я.И., Ганопольский М.И., Громов В.А., Рыбнов Ю.С., Кудрявцев В.И., Евменов В.Ф., Меньшиков П.В.

В работе Меньшикова П.В. [17] экспериментально получены коэффициенты возможного увеличения воздушной ударной волны в зависимости от характера изменения тем-

пературы с высотой. При отрицательном градиенте температур, увеличения избыточного давления ударной волны не наблюдается. При положительном градиенте температур возможны увеличения избыточного давления ударной волны от 25 до 100 раз, в зависимости от характера инверсии.

Результаты оценки увеличения избыточного давления  $\Delta p_f$  (200 Па) слабой ударной волны представлены в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты оценки увеличения избыточного давления  $\Delta p_f$  (200 Па) слабой ударной волны в зависимости от характера изменения температуры с высотой при взрыве облака ГВС метана**

Градиент температуры с высотой	Изменение скорости распространения ударной волны $V_{ув}$ с высотой $H$	$K$	$\Delta p_f$ , кПа	Степень поражения	
				С	П
Слабый положительный градиент около поверхности с сильно положительным градиентом вверх (инверсия)		25	5	растекление зданий	возможны осколочные травмы
Отрицательный градиент у поверхности с сильно положительным градиентом вверх (приподнятая инверсия)		100	20	средние повреждения зданий	серьезное повреждение тканей

где

$K$  – Коэффициент возможного увеличения избыточного давления  $\Delta p_f$  ударной волны;

С – сооружения;

П – персонал (население).

Из табл. 1 видно, что избыточное давление, увеличившись в 25 раз при приземной инверсии и в 100 раз при приподнятой инверсии, приводит к поражению человека на том же расстоянии, которое было безопасно для человека при отсутствии инверсии.

Таким образом, на дальних расстояниях необходимо учитывать увеличение значения избыточного давления при наличии температурной инверсии.

### Заключение

В условиях Арктики определяющими внешними факторами являются низкая температура атмосферного воздуха и аномальные метеорологические условия, характеризующиеся мощными продолжительными температурными инверсиями в сочетании со штилем. Эти внешние параметры окружающей среды оказывают влияние как на частоту аварий, так и на развитие аварий. В связи с этим, повышение промышленной безопасности опасных объектов, работающих в условиях Арктики, требует всестороннего учета влияния специфических для данного района природно-климатических факторов на параметры риска.

## Литература

1. Арктика // Большая Советская Энциклопедия. 3-е изд. / Гл. ред. А. М. Прохоров. — М.: Советская Энциклопедия. - 1970. — Т. 2. Ангола — Барзас. — С. 203—205.
2. Слепцов О.И., Левин А.И., Капитонова Т.А., Стручкова Г.П., Большаков А.М. Надежность и безопасность газопроводного транспорта в условиях Крайнего Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. - 2007. № 4. С.95-103
3. Махутов Н.А., Лебедев М.П., Большаков А.М., Захарова М.И. Особенности возникновения чрезвычайных ситуаций на газопроводах в условиях Севера // Вестник РАН. - 2017, Т. 87, № 9. - С. 858 – 862
4. Захарова М.И. Анализ риска аварий резервуаров и газопроводов в условиях Севера / Захарова М.И. // Безопасность труда в промышленности. – 2015. - № 2. - С. 54 – 64.
5. Гильдеева И.М. Влияние сезонных процессов промерзания-оттаивания грунта на эволюцию нефтяных загрязнений в Арктических районах / Под ред. Шиманского В.К. – СПб.: Недра. - 2003. – 122 с.
6. Маркарова М.Ю. Скорость очищения почв от нефти в условиях севера / М.Ю. Маркарова // Вестник Башкирского университета. - 2000. - №1. - С. 48 -51.
7. Махутов Н.А. Прогнозирование возникновения чрезвычайных ситуаций на объектах нефтегазового комплекса и ликвидация последствий аварийных разливов нефтепродуктов в арктических климатических условиях / Н.А. Махутов, М.П. Лебедев, А.М. Большаков, М.И. Захарова, Ю.С. Глязнецова, И.Н. Зуева, О.Н. Чалая, С.Х. Лифшиц // Арктика: экология и экономика. - 2016 - № 4(24). – С. 90 – 99
8. Большаков А.М., Захарова М.И. Частотный анализ аварий резервуаров при низких температурах // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2016. - № 8. - С. 32 – 33
9. Яковлев В.В. Экологическая безопасность, оценка риска: моногр. / В.В. Яковлев. - СПб.: СПбГПУ. - 2007. – 399 с
10. ГОСТ Р 12.3.047-2012 ССБТ. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.
11. Simpson IC (1984). Atmospheric transmissivity – The effects of atmospheric attenuation on thermal radiation, SRD (Safety and Reliability Directorate). Report R304, U.K. Atomic Energy Authority, Culcheth, Warrington, U.K., Oct. - 1984.
12. Тарабанов М.Г. J – d диаграмма влажного воздуха. Методические указания / М.Г. Тарабанов. – Волгоград. - 2003
13. Захарова М.И. Влияние низких температур окружающей среды на коэффициент пропускания атмосферы при оценках безопасных расстояний для человека от теплового воздействия пожара разлития нефтепродуктов // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций.
14. Большаков А.М., Захарова М.И. Идентификация опасностей эксплуатации газопроводов при низких температурах // Вестник машиностроения. – 2015. - № 10. – С. 53 – 56.
15. Захарова М.И. Анализ аварий с истечением газа из магистральных газопроводов и с последующим рассеиванием при аномальных метеоусловиях Севера // Безопасность жизнедеятельности. - 2016, № 1. – С. 50 – 54
16. Захарова М.И. Оценка риска аварийного истечения газа из газопровода при аномальных метеоусловиях Севера // Проблемы анализа риска. – 2018. - Т. 15. - № 2. – С. 78 – 85
17. Меньшиков П.В. Факторы, влияющие на интенсивность ударной воздушной волны // Технология и безопасность взрывных работ. Материалы научно - технической конференции "Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле". Екатеринбург. - 2011. С. 246–255.

## Сведения об авторе

*Захарова Марина Ивановна*, ведущий научный сотрудник, Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного научного учреждения Федеральный исследовательский центр «Якутский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ИФТПС СО РАН), 677891, г. Якутск, ул. Октябрьская 1, рабочий телефон: (4112) 39-05-52, e-mail: marine3@yandex.ru,