

УДК 614.838.1

**А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Ф.М. Гимранов** (Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Российская Федерация)

**ВЛИЯНИЕ МЕТЕОУСЛОВИЙ НА ДИНАМИКУ РАССЕЙВАНИЯ ОПАСНОГО ГАЗА, СБРАСЫВАЕМОГО ЧЕРЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВЕЧИ**

**A.I. Kuptsov, R.R. Akberov, F.M. Gimranov** (Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation)

**THE INFLUENCE OF METEOROLOGICAL CONDITIONS ON THE DYNAMICS OF THE DISPERSION OF HAZARDOUS GAS DISCHARGED THROUGH TECHNOLOGICAL VENTS**

**Введение**

В данной статье описана проблема учета распространения опасного газа в случае сброса через технологические свечи. Выявлены недостатки действующих нормативных методик.

**Цели и задачи**

Разработать математическую модель, которая позволила бы адекватно спрогнозировать характер распространения облаков опасных газов в атмосфере при сбросах через свечи, а также выявить влияние устойчивости атмосферы на эти процессы.

**Методы**

Численное моделирование.

**Результаты**

Приведено сравнение результатов расчетов по разработанной модели, по другим методикам с экспериментальными данными.

**Выводы**

Проанализированы результаты исследования влияния устойчивости атмосферы и скорости ветра на динамику формирования и рассеивания опасного газозвудушного облака при сбросах.

**Background**

The paper describes the problem of hazardous gas propagation when discharged through technological vents. Drawbacks of the standard methods in force have been identified.

**Aims and Objectives**

To develop a math model that would allow adequate forecast the character of propagation in the atmosphere of hazardous gas clouds, when discharged through vents; also, to assess the influence of stability of atmosphere on these processes.

**Methods**

Numerical modeling.

**Results**

Calculation results obtained using the developed model and by other methods are given against experimental data.

**Conclusion**

The results of studying influence of atmospheric stability and wind velocity on the dynamics of formation and dispersion of the discharged hazardous gas clouds have been analyzed.

**Ключевые слова:** численное моделирование, истечение газа, технологические свечи, влияние метеоусловий

**Key words:** numeric modeling, gas efflux, technological vents, influence of meteorological conditions

Согласно Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности [1], на случай возникновения аварийной ситуации предусматриваются системы аварийного освобождения из технологического оборудования. Для этой цели в отдельных ситуациях допускается сброс легких газов, содержащихся в оборудовании, через свечу рассеивания, то есть подразу-

меваются залповый выброс непосредственно в атмосферу. Кроме этого сбросы в атмосферу могут являться регламентированной процедурой, проводимой для опорожнения технологического оборудования и трубопроводов во время плановых ремонтных работ. В таких случаях сбросы со свечей выполняются, как правило, в течение достаточно продолжительного периода времени и характеризуются плавным падением давления среды в опорожняемом оборудовании.

© Купцов А.И., Акберов Р.Р., Гимранов Ф.М., 2015

В настоящее время в качестве нормативных документов для проектирования свечей и оценки зон распространения возможного выброса служат руководство по безопасности факельных систем (далее РБФС) [2] и ОНД-86 [3]. По этим методикам определяются конструктивные и эксплуатационные параметры технологической свечи: высота, диаметр и приемлемый расход сброса (кг/с), а также максимальная концентрация сбрасываемого газа на приземной поверхности. Однако, анализ аварий на ООО «Томскнефтехим» [4], газопроводе-подключении газоконденсатного месторождения Крайнего Севера [5] и некоторых других объектах, а также обработка экспериментальных данных по выбросам природного газа [6] дают основание предполагать, что у поверхности земли могут присутствовать скопления газа во взрывоопасных концентрациях. Из этого следует, что результаты расчетов, выполненных по методикам [2, 3], не дают адекватного представления данных о реальных процессах пространственно-временного рассеивания сбрасываемого со свечи газа. Оценка этих и некоторых других методик расчета рассеивания легких газов в атмосфере [7] показала, что лежащие в их основе упрощенные допущения и зависимости требуют многочисленных уточнений. Основным недостатком этих методик является использование различных подгоночных коэффициентов вместо прямого учета классов устойчивости атмосферы и наличия пересеченной местности или промышленной застройки на пути прохождения парогазовоздушного облака. Также не учитывается нестационарность процесса истечения газа со свечи, а скорость ветра задается заблаговременно перед началом расчета и не изменяется в процессе моделирования.

Для устранения недостатков вышеупомянутых моделей в последние годы для моделирования процесса распространения парогазовоздушных облаков в атмосфере начали применяться математические модели, основанные на технологии CFD (computational fluid dynamics) и использующие программные комплексы, позволяющие моделировать газодинамические процессы в многомерном пространстве. Одним из таких программных комплексов является многоцелевой коммерческий пакет Fluent [8], который в последнее время успешно применялся для решения задач обеспечения промыш-

ленной безопасности на технологических опасных производственных объектах как в России, так и за рубежом [9, 10]. На основании этих аргументов пакет Fluent был выбран в качестве основного вычислительного инструмента для моделирования.

#### Достоверность модели

Для оценки достоверности существующих методик и моделей результаты расчетов, выполненных с применением этих методик и моделей, должны быть сопоставлены с экспериментальными данными. Здесь были использованы данные, полученные в ООО «Газпром трансгаз Ставрополь» [6]. Во время экспериментов измерялась концентрация метана на высоте 1,5...2,0 м от уровня земли и на различных расстояниях от свечи (300, 520 и 1000 м) при залповом выбросе природного газа из магистрального газопровода через свечу высотой 2,7 м и диаметром 150 мм. Скорость ветра в процессе проведения экспериментов изменялась от 1,3 до 4,3 м/с. Температура воздуха составляла 17,75 °С. Во время измерений фиксировалось начальное давление ( $P = 4,4$  МПа) и массовый расход ( $M_{cp} = 2,73$  кг/с) на участке газопровода ( $D = 720$  мм;  $L = 0,334$  км). Объем газа, стравливаемый за 1 операцию, составлял 7119,78 м<sup>3</sup>.

Для моделирования пограничного слоя атмосферы с помощью программного комплекса Fluent использовалась физико-математическая модель, основанная на совместном решении нижеследующих уравнений [11]:

- уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха или газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $x_i$  – координаты  $x, y, z$  в метрах ( $x$  – координата в направлении ветра;  $y$  – координата в направлении поперек ветра;  $z$  – вертикальная координата);  $u_i$  – компоненты осредненной скорости ветра  $u, v, w$ , м/с;

- уравнение переноса импульса:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial(\rho u'_i u'_j)}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad (2)$$

где  $p$  – давление, Па;  $u'_i$  – пульсационные составляющие компонентов скорости, м/с;

- уравнение переноса энергии:

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda + c_p \frac{\mu}{Pr_i} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где  $h = C_p T$  – энтальпия, кДж/кг;  $C_p$  – удельная теплоемкость при постоянном давлении, кДж/(кг·К);  $T$  – температура воздуха, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  $Pr_t$  – турбулентное число Прандтля,  $Pr_t = 0,85$ ;

• уравнение переноса газа:

$$\frac{\partial(\rho Y_s)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i Y_s)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \rho D + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial Y_s}{\partial x_i} \right] + S_c, \quad (4)$$

где  $Y_s$  – массовая доля компонента  $s$  газовой смеси;  $Sc_t$  – турбулентное число Шмидта;  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии, зависящий от состава смеси, м<sup>2</sup>/с;  $S_c$  – источниковый член, определяющий генерацию газовой примеси, кг/(м<sup>3</sup>·с);

• уравнение переноса  $k$  (турбулентной кинетической энергии):

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad } k \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} + G_b - \rho \epsilon + S_k, \quad (5)$$

где  $S_k$  – источниковый член;  $G_b$  – член генерации (подавления) турбулентности;

• уравнение переноса  $\epsilon$  (скорости диссипации турбулентной кинетической энергии):

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \text{grad } \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (2\mu_t E_{ij} E_{ij} + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon, \quad (6)$$

где  $S_\epsilon$  – источниковый член, кг/(м·с<sup>4</sup>), который здесь принимается равным нулю; тензор  $E_{ij}$  определяется стандартными выражениями  $k$ - $\epsilon$  модели;  $C_{1\epsilon}$ ,  $C_{2\epsilon}$ ,  $C_{3\epsilon}$ ,  $C_\mu$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\epsilon$  – коэффициенты турбулентности;  $C_{3\epsilon}$  – коэффициент, связанный с силами плавучести.

Особенностями данной модели являются использование модифицированных значений констант турбулентности, а также добавление источникового члена в уравнение переноса турбулентной кинетической энергии (5), который позволяет учесть различные варианты атмосферной устойчивости на основе теории подобия Монино-Обухова [12]. Моделирование проводится в несколько этапов. Сначала рассчитывается пограничный слой атмосферы без выброса газа с целью получения и сохранения параметров атмосферы (профилей скорости ветра, турбулентной кинетической энергии, стратификации и т.д.) на протяжении всей расчетной области. От этих параметров существенно зависит пространственно-временное распространение сбрасываемого газа в атмосфере.

Геометрия расчетной области имеет правильную ортогональную форму с размерами 2000 м × 250 м × 250 м (длина × ширина × высота), а ее пространственная дискретизация выполнена с использованием трехмерных элементов регулярной гексаэдральной формы. Размеры расчетной области выбирались не случайным образом, а с учетом двух обстоятельств, одним из которых являлось то, что одно из граничных условий – нулевая концентрация сбрасываемого газа, а второе – длина области должна была быть минимальна для максимального снижения времени вычислений. Свеча устанавливалась внутри расчетной области на удалении 150 м от входной граничной плоскости. Пограничный слой атмосферы в начале расчета моделировался с некоторым упрощением, заключающимся в том, что граничное условие у оголовка свечи задавалось в форме непроницаемой твердой стенки («wall»). Впоследствии при моделировании сброса граничное условие на выходе из свечи было изменено на значение давления через применение встроенных пользовательских функций (UDF функции).

Сопоставление концентраций метана, определенных с применением различных методик и моделей, с экспериментально измеренными концентрациями при сравнении газа со свечи приведено в таблице 1.

Из анализа таблицы 1 видно, что наиболее близкими к экспериментальным данным являются данные, полученные при расчетах приземных концентраций с помощью CFD пакетов (PHAST и Fluent), которые позволяют учитывать нестационарные физические явления, сопровождающие сбросы газа со свечи. Интересно заметить, что результаты расчетов, произведенных с помощью программного продукта PHAST [6], отличаются от экспериментальных данных приблизительно на 30...50%. Данные, полученные с использованием программного продукта Fluent, также приемлемо согласуются с экспериментальными данными. Например, на удалении 300 м от свечи величина расхождения составляет 15...17%, возрастая до 50% в точке, соответствующей удалению от свечи 520 м; однако на удалении от свечи 1000 м величина расхождения снова снижается и составляет 27,4%. Эти расхождения можно увязать с неполнотой данных по метеоусловиям, имевшим место во время проведения экспериментов, при которых измерения температуры и

Таблица 1 – Осредненные рассчитанные и экспериментальные данные

Расстояние, м	Данные по концентрации, мг/м <sup>3</sup>				
	ОНД-86	РФБС	PHAST1	Fluent	Экспериментальные данные
300	53,5	4,84	3,08	5,52	4,75
520	54	2,86	4,79	4,90	3,25
1000	42	1,51	9,54	9,25	7,26

Примечание 1 – Расчеты по методике ОНД-86 и модели PHAST велись авторами статьи [6].

скорости производились всего лишь в одной точке пространства по высоте, а на других высотах никаких измерений не было.

Методика ОНД-86 дает значения концентрации, превышающие экспериментально определенные значения в несколько раз [6], а методика РФБС, несмотря на более точное описание явления рассеивания газа, не учитывает нестационарность процессов. Следовательно, данная методика не отслеживает тенденцию к росту концентраций со временем на определенных расстояниях. Например, на расстоянии 1000 м от свечи концентрация природного газа, в соответствии с этой методикой, продолжает падать, что может не совпадать с действительностью, и отличается от экспериментально измеренных концентраций почти в 5 раз. Также необходимо отметить, что плотность сбрасываемого газа, согласно методике РФБС, задавалась как плотность метана при нормальных условиях. Однако на начальной стадии сброса газа за счет эффекта дросселирования (захолаживания) плотность газа достигает величины, превышающей значение плотности при нормальных условиях. Предложенная физико-математическая модель, предполагающая применение пакета Fluent для численного интегрирования вышеприведенных дифференциальных уравнений, позволяет учитывать подобные особенности процесса; ее достоинством также является возможность установления зависимостей параметров атмосферы от времени. Данное обстоятельство становится особенно существенным при моделировании продолжительных выбросов. Применение этой модели и методики позволяет в будущем проводить анализ влияния конструктивных параметров на процесс истечения газа из свечи, что необходимо для успешного проектирования новых свеч и оптимизации режимных параметров при эксплуатации уже существующих свеч. Так, при проектировании новых

свеч необходимо закладывать условие, что сброс должен являться безопасным даже при наиболее неблагоприятных метеоусловиях; а для уже эксплуатируемых свеч, в первую очередь, важным является вычисление расхода, при котором значения концентраций в приземном слое атмосферы (в местах размещения производственных объектов) в результате сброса при любых классах устойчивости атмосферы не будут превышать величины предельно допустимой концентрации (ПДК) или значения нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПП) сбрасываемого газа.

*Анализ прогнозируемого расчета сброса со свечи*

Известно, что в случае присутствия приземной инверсии ослабление скорости ветра до штиля сопровождается затуханием турбулентного обмена [13, 14], что создает предпосылки для резкого повышения значений концентраций в области действия приземной инверсии. Достоверность этого заключения была подтверждена нами расчетным путем с применением программного комплекса Fluent. Рассматривались процессы выброса этилена из стандартной свечи (высота – 10 м, диаметр – 300 мм). Предполагалось, что этилен находится под давлением 0,3 МПа. Была проведена серия расчетов с варьированием двух параметров атмосферы: устойчивости атмосферы и скорость ветра.

На рисунке 1 приведены значения концентрации этилена на высоте 2 м при значениях скорости ветра 1, 5 и 10 м/с вместе со значениями ПДК для этилена. Очевидно, что выбросы через свечу являются наиболее опасными при скорости ветра 1 м/с независимо от устойчивости атмосферы. Как и ожидалось, в случае инверсии значения концентраций оказываются выше по сравнению с другими рассматриваемыми условиями атмосферной устойчивости; при этом, на расстоянии 1500 м от свечи концентрация до-

стигает максимальной величины – 6946 мг/м<sup>3</sup>. Результаты расчетов привели к одному интересному выводу, заключающемуся в том, что вблизи свечи при больших скоростях ветра значения концентрации при неустойчивой и нейтральной атмосферах оказываются выше, чем при устойчивой. Это можно объяснить тем, что этилен является легким газом, способным интенсивно перемешиваться с воздухом при высокой турбулизации атмосферы. Вследствие этого достаточно большое количество этилена попадает на земную поверхность. В случае же инверсии газ прижимается к земной поверхности намного сильнее, что видно на определенных расстояниях от свечи. Следует отметить, что при таком высоком значении расхода (71 кг/с) сбросы этилена небезопасны, так как во всех рассматриваемых случаях концентрация опасного газа, начиная с некоторого расстояния от свечи, начинает превышать значения ПДК. Из этого следует, что для безопасной эксплуатации свечи необходимо либо увеличивать ее высоту исходя из наиболее неблагоприятных метеоусловий, либо ограничивать расход выброса в каждом конкретном случае.

### Выводы

При сбросах газа через технологические свечи при определенных метеоусловиях непосредственно на территории промышленной площадки могут образовываться зоны с концентрациями, превышающими ПДК или НКПРП. Действующие нормативные методики не вполне корректно описывают характер рассеивания сбрасываемого со свечи газа. Предложенная физико-математическая модель совместно с методикой расчета, основанной на использовании программного комплекса Fluent, позволяет получать более точные прогнозы распространения опасного газа при его выбросах со свечи. Проведенные численные расчеты подтверждают предположение о том, что наиболее опасными метеоусловиями для выбросов газа со свечи являются инверсии по сравнению с любыми другими условиями атмосферной устойчивости.

Для предотвращения появления опасных концентраций сбрасываемого газа и обеспечения безопасности на территории промышленного предприятия необходимо учитывать в обязательном порядке расход газа через свечу и конкретные метеоусловия на момент сброса.

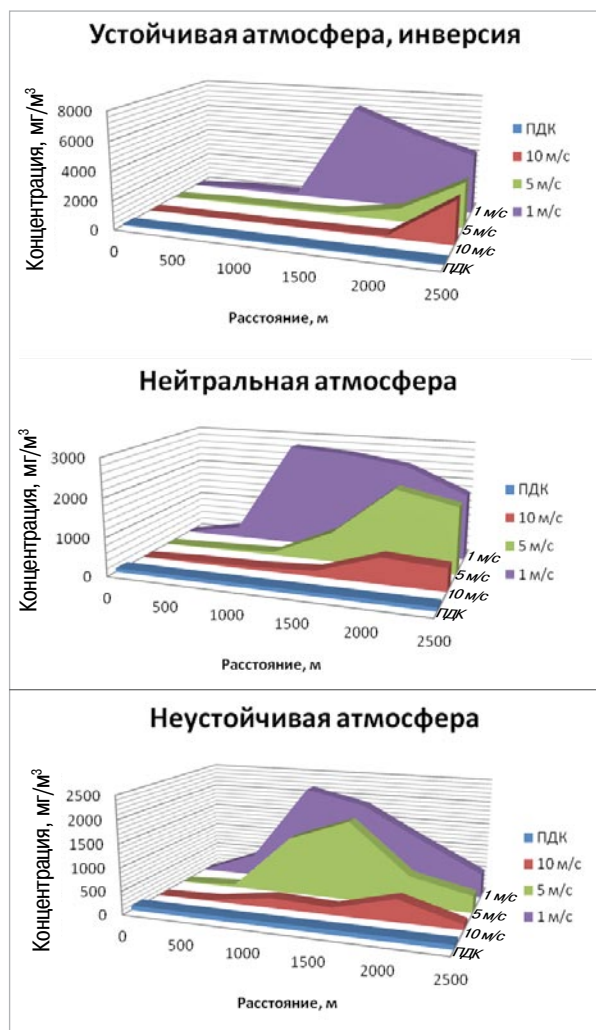


Рисунок 1 – Изменение концентраций этилена в зависимости от расстояния при различных устойчивостях атмосферы и скоростях ветра

### Литература

1. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Общие правила взрывобезопасности для взрывопожароопасных химических, нефтехимических и нефтеперерабатывающих производств» / Утв. приказом Ростехнадзора от 11 марта 2013 № 96.
2. Руководство по безопасности факельных систем / Утв. приказом Ростехнадзора от 26 декабря 2012 № 779.
3. ОНД-86. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий / Утв. Пред. Гос. ком. СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 4 августа 1986 г. № 192.
4. Информационный бюллетень Ростехнадзора. URL: [http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull\\_32/Bull\\_32\\_32-41.pdf](http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_32/Bull_32_32-41.pdf) (дата обращения: 01.04.2015).
5. Завгороднев А.В., Мельников А.В., Сафонов В.С. Проблема обеспечения безопасности сброса газа в атмосферу на объектах транспортирования и хранения природного газа // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 11. С. 66-71.
6. Завгороднев А.В., Аكوпова Г.С., Толстова Н.С., Мельников А.В. Результаты исследований рассеивания в атмосфере организованных нестационарных выбросов газа на объектах газотранспортных предприятий // Территория «Нефтегаз». 2011. № 12. С. 90-97.
7. Купцов А.И., Акберов Р.Р., Исламхузид Д.Я., Гимранов Ф.М. Проблемы расчета рассеивания легких газов в атмосфере при их выбросах со свечи с учетом рельефа и застройки местности и атмосферной устойчивости // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 284-286.
8. Fluent 6.3. User's Guide / Fluent Inc. Lebanon, 2006.
9. Галеев А.Д., Поникаров С.И., Салин А.А. Моделирование последствий аварийного пролива бинарного раствора с использованием программы Fluent // Математическое моделирование. 2011. № 7. С. 129-144.
10. Pontiggia M., Derudi M., Busini V., Rota R. Hazardous Gas Dispersion: a CFD Model Accounting for Atmospheric Stability Class // Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 171, No. 1. P. 739-747.
11. Купцов А.И., Акберов Р.Р., Исламхузид Д.Я., Гимранов Ф.М. Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации // Фундаментальные исследования. 2014. № 9-7. С. 1452-1460.
12. Обухов А.М. Турбулентность и динамика атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 413 с.
13. Берлянд М.Е. Прогноз и регулирование загрязнения атмосферы. Л.: Гидрометеиздат, 1985. 268 с.

### References

1. *Federal'nye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Obshchie pravila vzryvobezopasnosti dlya vzryvopozharoопасnykh khimicheskikh, neftekhimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh proizvodstv»* (Utv. prikazom Rostekhnadzora ot 11 marta 2013 № 96) [Federal Norms and Regulations in the Industrial Safety «General Rules of Explosion Safety for Explosion and Fire Hazardous Chemical, Petrochemical and Refining Industries» (Appr. by Rostekhnadzor Order dd. March, 11, 2013, No. 96)]. (in Russ.).
2. *Rukovodstvo po bezopasnosti fakel'nykh sistem* (Utv. prikazom Rostekhnadzora ot 26 dekabrya 2012 № 779). [Instructions for Flare System Safety (Appr. by Rostekhnadzor Order dd. December, 26, 2012, No. 779)]. (in Russ.).
3. *OND-86. Metodika rascheta kontsentratsii v atmosfernom vozdukhе vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatii* (Utv. Pred. Gos. kom. SSSR po gidrometeorologii i kontrolyu prirodnoi sredy 4 avgusta 1986 g. № 192) [OND-86. The Method of Calculating Concentrations in Atmospheric Air of Harmful Substances Contained in Emissions of Enterprises (Appr. by Chairman of the. State. Com. of the USSR for Hydrometeorology and Control of Natural Environment on August, 4, 1986, No. 192)]. (in Russ.).
4. *Informatsionnyi byulleten' Rostekhnadzora* [Newsletter of Rostekhnadzor]. Available at: URL: [http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull\\_32/Bull\\_32\\_32-41.pdf](http://ib.safety.ru/assets/pdf/Bull_32/Bull_32_32-41.pdf) (accessed 01.04.2015). (in Russ.).
5. Zavgorodnev A.V., Mel'nikov A.V., Safonov V.S. Problema obespecheniya bezopasnosti sbrosa gaza v atmosferu na ob'ektakh transportirovaniya i khraneniya prirodno gaza [The Problem of Ensuring Safe Gas Discharge into the Atmosphere at the Natural Gas Transportation and Storage Facilities]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Occupational Safety in Industry*, 2011, No. 11, pp. 66-71. (in Russ.).
6. Zavgorodnev A.V., Akopova G.S., Tolstova N.S., Mel'nikov A.V. Rezul'taty issledovaniya rasseivaniya v atmosfere organizovannykh nestatsionarnykh vybrosov gaza na ob'ektakh gazotransportnykh predpriyatii [The Results of Studies of Dispersion in the Atmosphere of Organized Unsteady Gas Emissions from the Facilities of Gas Transport Enterprises]. *Territoriya «Neftegaz» – Territory «Neftegaz»*, 2011, No. 12, pp. 90-97. (in Russ.).
7. Kuptsov A.I., Akberov R.R., Islamkhuzin D.Ya., Gimranov F.M. Problemy rascheta rasseivaniya legkikh gazov v atmosfere pri ikh vybrosakh so svechi s uchetom rel'efa i zastroyki mestnosti i atmosferno ustoichivosti [Problems of Calculating Dispersion of Light Gases in the Atmosphere when Emitted from Flare Stack, with Consideration of Terrain, Building and Atmospheric Stability]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta – Herald of Kazan Technological University*, 2014, T. 17, No. 6, pp. 284-286. (in Russ.).
8. *Fluent 6.3. User's Guide*. Lebanon, Fluent Inc., 2006.
9. Galeev A.D., Ponikarov S.I., Salin A.A. Modelirovanie posledstviy avariinogo proliva binarnogo rastvora s ispol'zovaniem programmy Fluent [Modeling of the Consequence of a Binary Solution Emergency Spillage Using Fluent Program]. *Matematicheskoe modelirovanie – Mathematical Models and Computer Simulations*, 2011, No. 7, pp. 129-144. (in Russ.).

14. Маршалл В. Основные опасности химических производств. М.: Мир, 1989. 671 с.

10. Pontiggia M., Derudi M., Busini V., Rota R. Hazardous Gas Dispersion: a CFD Model Accounting for Atmospheric Stability Class. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, Vol. 171, No. 1, pp. 739-747.

11. Kuptsov A.I., Akberov R.R., Islamkhuzin D.Ya., Gimranov F.M. Chislennoe modelirovanie pogranichnogo sloya atmosfery s uchetom ee stratifikatsii [Numerical Modeling of the Atmospheric Boundary Layer with the Account of Its Stratification]. *Fundamental'nye issledovaniya – Fundamental Research*, 2014, No. 9-7, pp. 1452-1460. (in Russ.).

12. Obukhov A.M. *Turbulentnost' i dinamika atmosfery* [Atmospheric Turbulence and Dynamics]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1988, 413 p. (in Russ.).

13. Berlyand M.E. *Prognoz i regulirovanie zagryazneniya atmosfery* [Forecast and Control of Atmospheric Pollution]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 268 p. (in Russ.).

14. Marshall V. *Osnovnye opasnosti khimicheskikh proizvodstv* [Main Hazards of Chemical Enterprises]. Moscow, Mir, 1989, 671 p. (in Russ.).

### Авторы

• Купцов Аделя Игоревич  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Аспирант кафедры промышленной безопасности  
Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68  
e-mail: artpb@yandex.ru

• Акберов Роальд Рифкатович, канд. техн. наук  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Доцент кафедры промышленной безопасности  
Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68  
e-mail: roaldakberov@yahoo.com

• Гимранов Фидаис Мубаракевич, д-р техн. наук, профессор  
Казанский национальный исследовательский технологический университет  
Заведующий кафедрой промышленной безопасности  
Российская Федерация, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68  
тел. (843) 231-42-38  
e-mail: expert-92@mail.ru

### The authors

• Kuptsov Adel I.  
Kazan National Research Technological University  
Post-graduate Student of Industrial Safety Chair  
68, K. Marks str., Kazan, 420015, Russian Federation  
e-mail: artpb@yandex.ru

• Akberov Roalyd R., Candidate of Technical Sciences  
Kazan National Research Technological University  
Assistant Professor of Industrial Safety Chair  
68, K. Marks str., Kazan, 420015, Russian Federation  
e-mail: roaldakberov@yahoo.com

• Gimranov Fidais M., Doctor of Technical Sciences, Professor  
Kazan National Research Technological University  
Head of Industrial Safety Chair  
68, K. Marks str., Kazan, 420015, Russian Federation  
tel: (843) 231-42-38  
e-mail: expert-92@mail.ru