

База данных натуральных экспериментов для верификации математических моделей рассеяния облаков «тяжелого» газа¹



А.А. Агапов,
канд. техн. наук,
директор расчетно-аналитического центра

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



В.В. Банников,
мл. науч. сотрудник



Е.А. Дегтярева,
науч. сотрудник,
degtyareva@safety.ru

АНО «Агентство исследований промышленных рисков», Москва, Россия



С.И. Сумской,
канд. техн. наук,
ст. преподаватель

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Разработана база данных TOXI+Verify, включающая данные зарубежных и отечественных научных отчетов, позволяющая оценить точность программных комплексов по моделированию аварийных выбросов на соответствие экспериментальным данным.

Ключевые слова: база данных, эксперимент, верификация, рассеяние, «тяжелый» газ.
DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-35-44

Введение

Численное моделирование последствий аварий является одним из основных элементов количественной оценки риска аварий на опасных производственных объектах (ОПО), применяемой в том числе при подтверждении достаточности компенсирующих мероприятий при разработке специальных технических условий и обоснований безопасности ОПО.

Один из этапов моделирования аварий с выбросом опасных веществ (ОВ) — прогнозирование последствий рассеяния газа или паров жидкости, поступивших в окружающую среду из разгерметизированного оборудования, для которого проводятся исследования возможности токсического поражения персонала и третьих лиц и оценка массы ОВ во взрывоопасных пределах в целях определения последствий возможного взрыва топливно-воздушной смеси (ТВС) с образованием ударных волн или последствий термического излучения при воспламенении облака ТВС. Для моделирования рассеяния ОВ при авариях на ОПО применяются различные математические методы, в том числе изложенные в Руководстве по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» [1]. Используемая в упомянутом

документе математическая модель [2], подробно описанная и верифицированная в работах [3, 4], относится к так называемым интегральным моделям рассеяния «тяжелого» газа, которые обычно дают более корректные результаты по сравнению с упрощенными «гауссовыми» моделями [5, 6]. Наиболее популярными отечественными программными средствами для моделирования рассеяния «тяжелого» газа, в которых реализована методика [1], являются программные комплексы (ПК) TOXI+Risk 5* и TOXI+Meteo [7].

При разработке и верификации математических моделей, лежащих в основе программных средств для моделирования рассеяния «тяжелого» газа, использовались результаты экспериментов при различных условиях загроможденности окружающего пространства и состояниях атмосферы. В основном эти эксперименты проводили в 1970–1980-е годы. Информация об аналогичных крупных экспериментах, выполненных в последующие годы, в открытых

¹ «Тяжелый» газ — смесь воздуха, газовой фазы и капель опасного вещества, плотность которой выше плотности окружающего воздуха.

* Программный комплекс TOXI+Risk 5. URL: <https://toxi.ru/produkty/programmnyi-kompleks-toxirisk-5> (дата обращения: 23.05.2018).

литературных источниках практически отсутствует. Только в 2010 и 2015–2016 гг. в штате Юта (США) провели новую серию натурных экспериментов с выбросом хлора [8, 9]. Причем было заявлено, что в ближайшие десять лет подобных экспериментов не планируется. Информация об экспериментах, проводимых российскими исследователями, отсутствует в свободном доступе. Однако подробные отчеты об экспериментах, проведенных за рубежом, опубликованы в открытой печати. В ходе исследования удалось собрать и систематизировать информацию по следующим сериям экспериментов:

Thorney Island, 1982–1984 гг., выбросы смесей фреона с азотом [10–12];

Burro, 1980 г., выбросы сжиженного природного газа (СПГ) [13];

Coyote, 1981 г., выбросы СПГ [14];

Mapling Sands, 1980 г., выбросы СПГ [15, 16];

Falcon, 1987 г., выбросы СПГ [17];

Desert Tortoise, 1983 г., выбросы аммиака [18] и др.

Несмотря на то, что все эти эксперименты проводили более 30 лет назад, их результаты сохраняют актуальность и полезность для совершенствования и верификации моделей рассеяния. Например, для формализации процедуры верификации моделей рассеяния аварийных выбросов СПГ Национальной ассоциацией противопожарной защиты¹ (США) в 2007 г. разработан протокол оценки модели (ПОМ) [19]. В соответствии с ПОМ при верификации требуется провести расчеты по данным 33 специально отобранных натурных экспериментов с выбросом «тяжелого» газа для различных условий и сравнить результаты расчета с показаниями датчиков, полученными в экспериментах. Согласно ПОМ для

подтверждения корректности математической модели и соответствующего программного продукта требуется, чтобы статистические отклонения между результатами расчетов и замеров лежали в заранее заданном допустимом диапазоне.

Развитие методов моделирования распространения аварийных выбросов ОВ, совершенствование методологии оценки риска аварий, введение инструментов риск-ориентированного надзора в сфере промышленной безопасности и следующая из этого необходимость верификации программных средств и методических подходов, применяемых для оценки риска и моделирования аварий на ОПО, обусловили создание в ЗАО НТЦ ПБ базы данных (БД) TOXI+Verify с результатами натурных экспериментов с выбросом «тяжелых» газов. Из иностранных аналогов БД TOXI+Verify наиболее широко известна БД RADIPHEM (Review and Dissemination of Physical Effect Models)¹.

Обзор возможностей БД TOXI+Verify

База данных включает информацию, полученную в 40 широкомасштабных сериях экспериментов на основании показаний более чем 900 датчиков концентраций. Для некоторых экспериментов кроме сведений по концентрации в базе содержатся результаты измерений температуры в облаке газа.

По каждому эксперименту имеется подробное описание времени, места и условий его проведения, а также формализованная таблица параметров эксперимента, которые можно использовать для инициирования автоматического расчета в ПК TOXI+Risk 5. Пример перечня параметров некоторых экспериментов серий Burro и Thorney Island приведен в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Подсерия экспериментов		
	BU-2	BU-3	TI-8
Название вещества	LNG Burro 2	LNG Burro 3	Freon TI-8
Состав смеси, % об.	метан — 91,3; этан — 7,2; пропан — 1,1	метан — 92,5; этан — 6,2; пропан — 1,3	фреон — 21; нитроген — 12,79
Молярный вес, кг/кмоль	17,47	17,26	47,11
Плотность ОВ в выбросе, кг/м ³	432,2	432,7	1520
Температура кипения, К	111,6	111,6	243,4
Теплота испарения, Дж/кг	511 900	511 900	165 000
Удельная теплоемкость газа (пара), Дж/кг·К	2238	2238	610
Удельная теплоемкость жидкости, Дж/кг·К	3348,5	3348,5	970,0
Температура выброса, К	111,60	111,60	290,68
Фазовое состояние выброса	жидкость	жидкость	газ
Диаметр лужи пролива (обвалования), м	58	58	—
Массовый расход выброса, кг/с	85,7	86,4	—
Длительность выброса, с	173	167	10

¹ An overview of the REDIPHEM project/ N.J. Duijm, B. Stork, M. Nielsen, S. Ott// International Journal of Environment and Pollution. — 1995. — Vol. 5. — № 4–6. — P. 635–644.

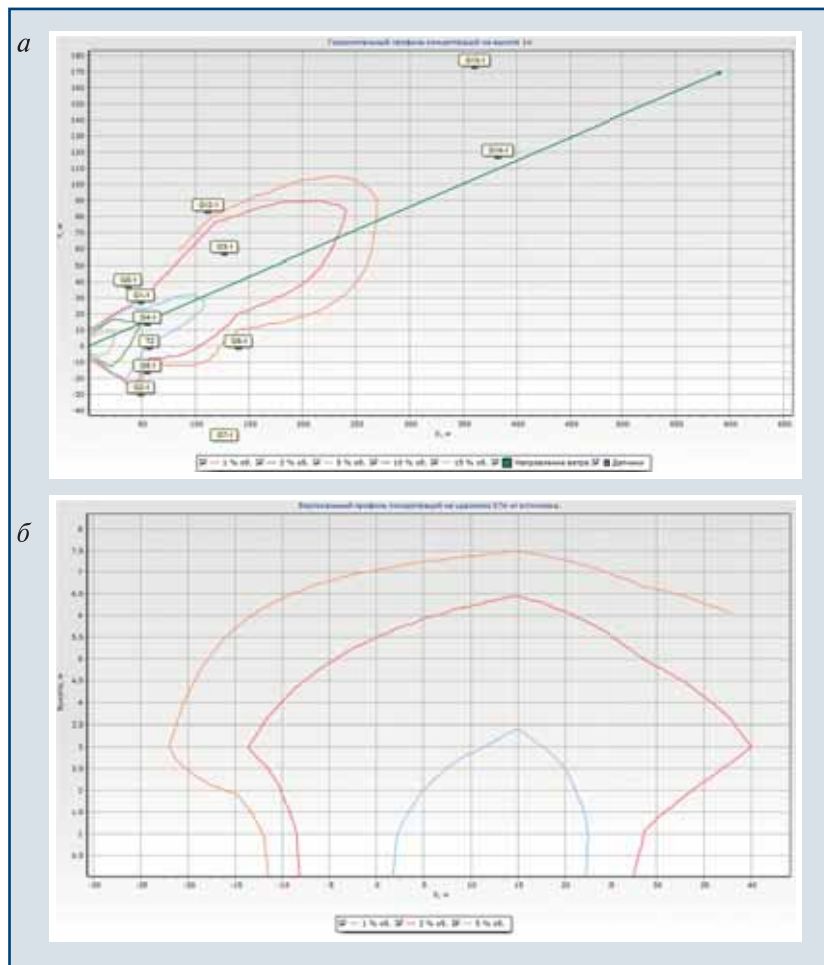
¹ NFPA. URL: <https://www.nfpa.org> (дата обращения: 23.05.2018).

Параметр	Подсерия экспериментов		
	BU-2	BU-3	TI-8
Общая масса выброса, кг	14 825	14 712	3958
Начальный процент разбавления воздухом (100 % — чистый выброс)	100	100	100
Высота оголовка трубы над поверхностью, м	1,5	1,5	—
Температура воздуха, К	310,60	307,75	290,68
Высота замера температуры воздуха, м	1	1	2
Атмосферное давление, атм	0,940	0,928	1,009
Скорость ветра, м/с	5,59	5,58	2,40
Высота замера скорости ветра, м	3	3	10
Осредненная по региону скорость ветра, м/с	5,4	5,4	0
Дисперсия осреднения скорости ветра, м/с	1,80	1,19	0
Осредненное направление ветра, градус	13,5	13,3	0
Время осреднения метеоданных, с	360	360	600
Угол отклонения направления ветра от положительной оси X, градус	-16,0	-1,1	-105,0
Класс устойчивости атмосферы	B	C	D
Температура подстилающей поверхности, К	310,6	307,8	291,6
Шероховатость подстилающей поверхности, м	0,0002	0,0002	0,0120
Время осреднения показаний датчиков, с	100	100	30

Для датчиков концентраций в БД хранится информация об их месте расположения. Предусмотрена возможность отобразить положение датчиков в системе координат, ориентированной по направлению ветра, которая используется в ПК ТОХИ+Risk 5. Для некоторых экспериментов в БД представлены изолинии концентраций, полученные путем интерполяции данных с датчиков на фиксированные моменты времени в горизонтальном сечении на определенных высотах (рис. 1, а) и в вертикальном сечении на определенном расстоянии от источника (рис. 1, б). На поля изолиний при необходимости могут быть нанесены обозначения расположения датчиков и их коды.

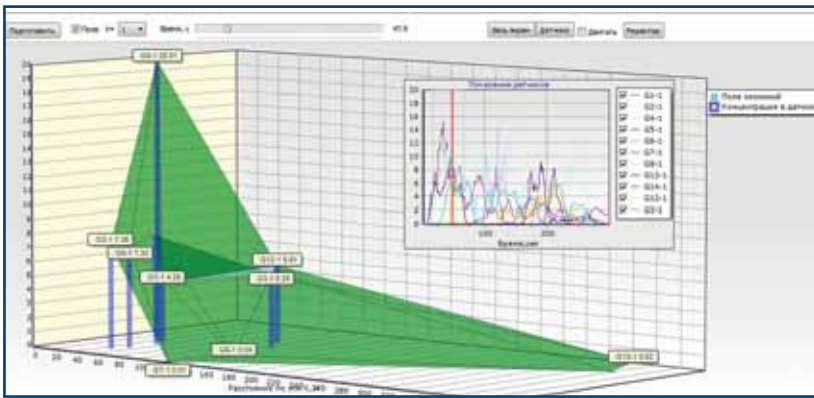
Другим способом представления распределения концентраций в пространстве в БД ТОХИ+Verify является трехмерное анимированное поле концентраций (рис. 2). Высота столбцов на поле соответствует концентрации, зафиксированной соответствующим датчиком. Кроме того, предусмотрена возможность вывода на этом поле графика с профилями концентраций во всех датчиках эксперимента. Вертикальная линия на графике соответствует текущему моменту времени.

Профиль концентраций, зафиксированных датчиком, строится путем



▲ Рис. 1. Изолинии концентраций в эксперименте Burro 2 в горизонтальной плоскости на момент времени 70 с

▲ Fig. 1. Concentration isolines in Burro 2 experiment in the horizontal plane at a point in time of 70 s



▲ Рис. 2. Трехмерное анимированное поле концентраций в эксперименте Burro 2 на основе показаний датчиков, расположенных на высоте 1 м

▲ Fig. 2. Three-dimensional animated field of concentrations in Burro 2 experiment based on the readings of sensors located at a height of 1 m

оцифровки представленных в отчетах графических данных. В БД предусмотрена возможность строить графики концентраций, осредненных по заданным интервалам времени. Например, в экспериментах серии Burro время осреднения принимается равным 100 с (см. табл. 1).

Использование БД TOXI+Verify для верификации ПК TOXI+Risk 5

В целях верификации программного обеспечения, предназначенного для моделирования рассеяния выбросов в атмосферу, в управляющей оболочке БД TOXI+Verify предусмотрена возможность вызова расчетного модуля «Мастер-ТОХИ», включенного в состав расчетных модулей ПК TOXI+Risk 5. В модуле «Мастер-ТОХИ» используется методика руководства по безопасности [1], которая, в свою очередь, основывается на модели «тяжелого» газа [2]. Данная модель описывает четыре типовых сценария выброса: полное и частичное разрушение оборудования, содержащего ОВ в газовом состоянии, а также полное и частичное разрушение оборудования, изначально содержащего жидкую среду. В зависимости от условий проведения каждого из экспериментов для его моделирования в расчетном комплексе создается необходимый сценарий. Вызов расчетного модуля «Мастер-ТОХИ» осуществляется непосредственно из БД TOXI+Verify с автоматической подстановкой параметров текущего эксперимента и сохранением результатов расчета в БД.

Приведем примеры моделирования распространения ОВ, выполненного по данным экспериментов серий Burro (BU-3), Coyote и Thorney Island (TI-8).

Резервуар, использованный в серии экспериментов Burro, из которого осуществляли выброс СПГ, представлял собой цилиндрическую емкость объемом 40 м³ в вакуумной рубашке (vacuum jacketed) объемом 52 м³. Сжиженный природный газ находился при рабочем давлении 240 кПа, которое создавалось за счет газообразного азота. Через вер-

тикальную трубу диаметром 25 см осуществляли выброс СПГ в центр водного бассейна диаметром около 58 м и глубиной 1 м. Срез трубы, через которую подавали СПГ, располагался на высоте 1 м над поверхностью воды. На небольшом расстоянии ниже поверхности воды под струей находилась плоская пластина, представляющая собой дефлектор для улавливания брызг и направления потока в горизонтальной плоскости. На площадке было 25 станций замера газа, которые располагались по дуге на расстоянии 57, 140, 400 и 800 м от места выброса. Датчики разместили на специальных мачтах на высоте 1, 3 и 8 м над уровнем земли. Осевая линия

массива датчиков была ориентирована в направлении преобладающих в данной местности ветров. Рельеф местности с подветренной стороны от места разлива имел угол наклона вверх 7° на протяжении 80 м, затем выравнивался.

В качестве типового выброса этой серии выбран опыт BU-3. На том же полигоне несколько позднее выбросы и горение СПГ изучали в экспериментах серии Coyote. С точки зрения процесса рассеяния эти опыты полностью аналогичны экспериментам серии Burro и для их моделирования могут использоваться те же методические подходы.

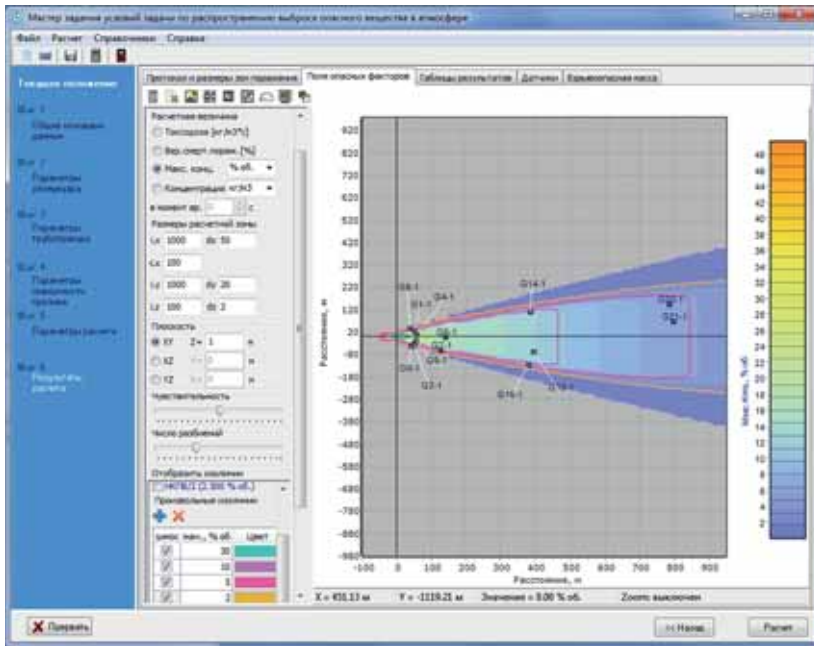
В серии Thorney Island проведены натурные эксперименты с выбросом «тяжелого» газа (смесь фреона с азотом). Программа испытаний включала три группы экспериментов, в том числе залповые и продолжительные выбросы в свободном и искусственно загроможденном пространстве. Как следствие, начальные размеры облака при моделировании рассеяния можно сопоставлять с размерами конструкции: вертикальный цилиндр диаметром основания 14 м и высотой 13 м. Для регистрации концентрации рассеиваемого газа использовали систему стационарно установленных датчиков, расположенных на опорах на разной высоте (0,4; 1,4; 2,4 и 4,4 м). Датчики группами по четыре-пять штук смонтировали на разной высоте на 38 вышках, которые располагались в виде равномерной прямоугольной сетки через 100 м. Вблизи источника (менее 250 м) датчики располагались более плотно. Рассеяние выброса осуществляли над достаточно ровной долиной длиной 2 км и шириной 500 м.

Свойства смеси углеводородов, выброс которой осуществлялся в эксперименте BU-3, были предварительно рассчитаны с использованием модуля «Свойства природного газа» ПК TOXI+Risk 5 в соответствии с ГОСТ 30319.1—96, ГОСТ 30319.2—96, ГОСТ 30319.3—96, ГОСТ Р 8.662—2009 и ГОСТ 31369—2008. Учитывая, что водный бассейн, куда осуществляли выброс, расположен на 1,5 м ниже

уровня берегов, при моделировании использовали режим выброса в обвалование диаметром, равным эффективному диаметру бассейна, и высотой 1,5 м. Шероховатость местности, над которой происходило рассеяние, согласно табл. 1, принималась равной 0,0002 м, что соответствует в терминах руководства по безопасности [1] типу местности «ровная поверхность пустыни». Для моделирования был выбран сценарий 4 (частичное разрушение емкости, содержащей ОВ в жидком и газовом состоянии) с конфигурацией «резервуар и трубопровод». Результаты расчетов приведены на рис. 3.

Для уменьшения фактора неопределенности параметров эксперимента в целях верификации модели рассеяния использован оценочный параметр «массовый расход выброса», который имеется в табл. 1 и для эксперимента BU-3 составляет 86,4 кг/с. Этот параметр можно использовать в качестве эффективной скорости поступления газа в атмосферу. В табл. 2 приведены результаты моделирования рассеяния выброса в условиях эксперимента для трех значений шероховатости местности, над которой происходит рассеяние: для значения шероховатости по данным табл. 1 (0,0002 м); для значения, принятого при моделировании эксперимента BU-3 при валидации программного комплекса FLACS [20] (0,001 м); для значения шероховатости местности, соответствующей в терминах модуля «Мастер-ТОХИ» понятию «равнинная местность, трава до 15 см» (0,01 м). Как видно из табл. 2, результаты расчета, полученные при использовании эффективной скорости поступления ОВ и принятой в отчете [13] шероховатости местности, хорошо коррелируются с данными замеров концентрации для датчиков, расположенных в ближней зоне (до 200 м) от источника.

В дальнейших расчетах при выборе исходных данных использованы эффективная скорость поступления ОВ в атмосферу и шероховатость подстилающей поверхности, рекомендованные в отчете [13]. На рис. 4 приведены сравнительные временные профили расчетной и измеренной концентраций для двух датчиков эксперимента



▲ Рис. 3. Экранная форма модуля «Мастер-ТОХИ» для эксперимента BU-3: изолинии максимальных концентраций и места размещения датчиков

▲ Fig. 3. Display form of «Master-TOXI» module for BU-3 experiment: isolines of maximum concentrations and locations of sensors

Таблица 2

Код и координаты (x, y, z) датчика, м	Максимальная замеренная концентрация, % об.		Максимальная расчетная концентрация, % об.		
	Осредненная за 1 с	Осредненная за 100 с	Шероховатость местности 0,0002 м («ровная поверхность пустыни»)	Шероховатость местности 0,001 м («трава высотой до 1 см»)	Шероховатость местности 0,01 м («трава высотой до 15 см»)
G1-1 (48,5; -29,6; 1) ¹	28,00	7,600	0	0	0
G2-1 (48,5; 27,8; 1)	20,60	8,600	0	0	0
G4-1 (55,9; 13,9; 1)	20,30	7,800	15,10	18,28	24,62
G5-1 (55,3; -15,9; 1)	22,20	7,800	15,23	18,40	24,79
G6-1 (140,0; -2,4; 1)	8,96	6,400	10,42	11,99	11,44
G14-1 (384,0; 111,3; 1)	0,01	0,002	0,14	0,17	0,11
G15-1 (394,4; -66,7; 1)	0,79	0,490	4,99	4,13	2,46
G16-1 (379,9; -124,6; 1)	0,42	0,030	0,01	0,01	0,01
G20-1 (786,0; 145,3; 1)	2,00	0,760	0,89	0,64	0,27
G21-1 (797,0; 66,0; 1)	4,00	1,890	1,77	1,33	0,73

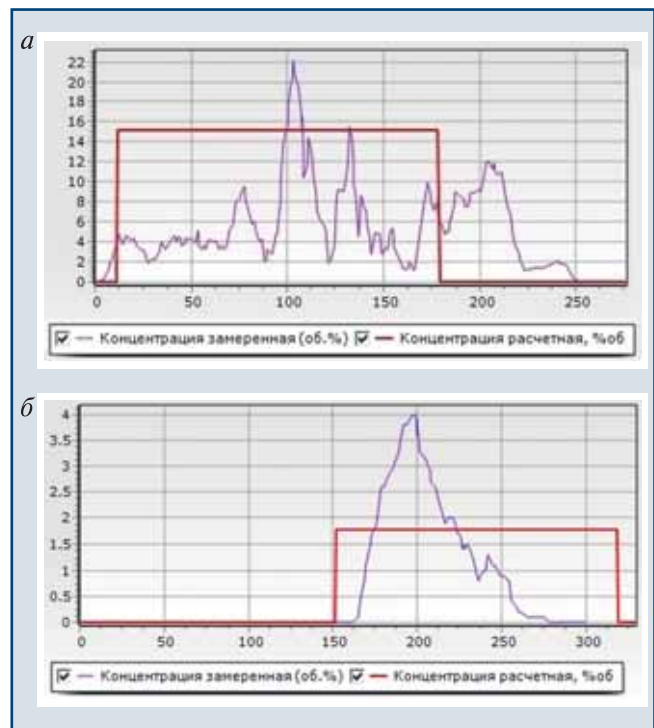
¹ Здесь и далее используется следующий принцип обозначения координат датчика: первое число обозначает смещение по направлению ветра от центра выброса; второе — смещение вправо (влево) от направления выброса (знак «-» — влево); третье — высоту датчика над землей.

BU-3. Кроме максимальной осредненной концентрации критерием сравнения рассчитанных и измеренных значений является накопленная доза, которая рассчитывается как интеграл под кривой концентраций за время наблюдения (табл. 3). В целом наблюдается удовлетворительное совпадение данных экспериментов и расчетов, причем лучшее совпадение имеет место для точек, лежащих на оси, а для точек, удаленных от оси ближе к краю струи, расхождение более существенно. Это объясняется тем, что на краю шлейфа струя под действием крупномасштабных пульсаций ветра «уходила» в сторону от датчика, что не учитывалось при моделировании.

В качестве иллюстрации статистики расхождения расчетных и измеренных максимальных осредненных концентраций СПГ для экспериментов серий *Virgo* и *Coyste* на рис. 5 приведена экранная форма со сравнительной статистикой по нескольким критериям. В качестве критериев используются предложенные в ПОМ [19] пороговые значения для нескольких статистических функций (табл. 4).

Отметим, что для сопоставления могут использоваться как датчики, включенные в ПОМ, так и произвольные, имеющиеся в БД. Для более чем 260 датчиков из БД по большинству приведенных критериев результаты расчетов в среднем хорошо коррелируются с результатами замеров, хотя для отдельных датчиков расхождения между результатами расчета и замеров различаются более чем в 10 раз (см. рис. 5). Как правило, результаты расчета дают более консервативные значения по сравнению с экспериментом, в большинстве случаев наиболее сильное расхождение имеет место для датчиков на краю струи, что объясняется пульсациями струи. Датчики, где получены нулевые расчетные значения концентраций, вероятнее всего из-за изменения направления ветра в процессе эксперимента, исключены из статистической выборки. Также причинами расхождения являются известные ограничения модели рассеяния, исключение из рассмотрения струевого характера выброса, неучет осаждения частиц СПГ в результате конденсации паров воды в воздухе и др. Как видно из рис. 5 (сводка статистики в правом верхнем углу), модель [1] достаточно хорошо описывает процесс рассеяния: согласно экспериментам *Virgo* и *Coyste* по четырем из пяти критериев модель удовлетворяет критериям ПОМ.

В качестве типového выброса серии *Thorney Island* выбран опыт TI-8. Запловый выброс в терминах руководства по безопасности [1] соответствует

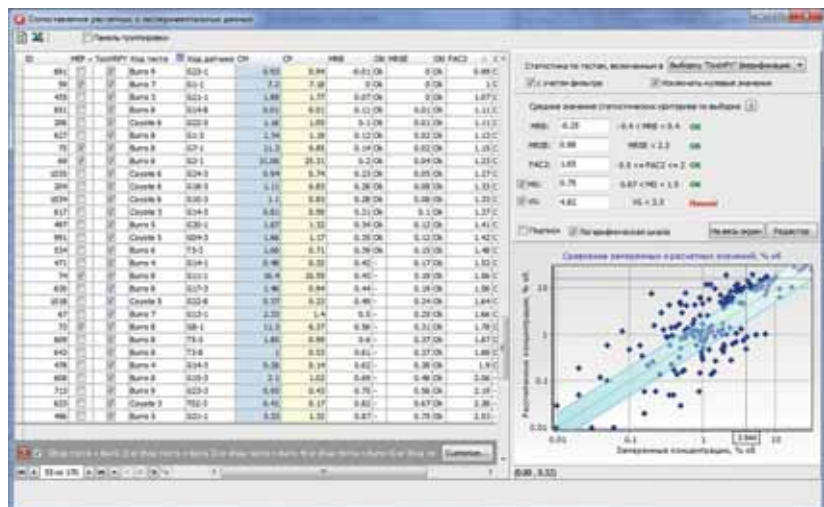


▲ Рис. 4. Профиль измеренной и расчетной концентраций в датчиках G5-1 (а) и G21-1 (б) в эксперименте BU-3

▲ Fig. 4. Profile of the measured and calculated concentrations in G5-1 (a) and G21-1 (b) sensors in BU-3 experiment

Таблица 3

Код и координаты (x, y, z) датчика, м	Доза, кг·с/м³		Относительное отклонение, %
	Расчет	Эксперимент	
G4-1 (55,9; 13,9; 1)	17,200	10,500	48,4
G5-1 (55,3; -15,9; 1)	17,400	10,500	49,5
G6-1 (140,0; -2,4; 1)	11,900	8,000	39,2
G14-1 (384,0; 111,3; 1)	0,164	0,001	197,6
G15-1 (394,4; -66,7; 1)	5,700	0,400	173,8
G20-1 (786,0; 145,3; 1)	0,600	0,200	100,0
G21-1 (797,0; 66,0; 1)	1,300	2,000	42,4



▲ Рис. 5. Экранная форма БД TOXI+Verify

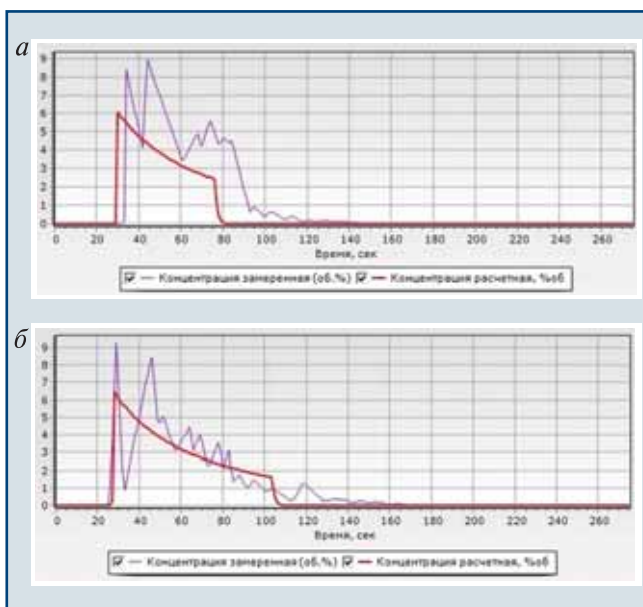
▲ Fig. 5. Display form BD TOXI+Verify

Таблица 4

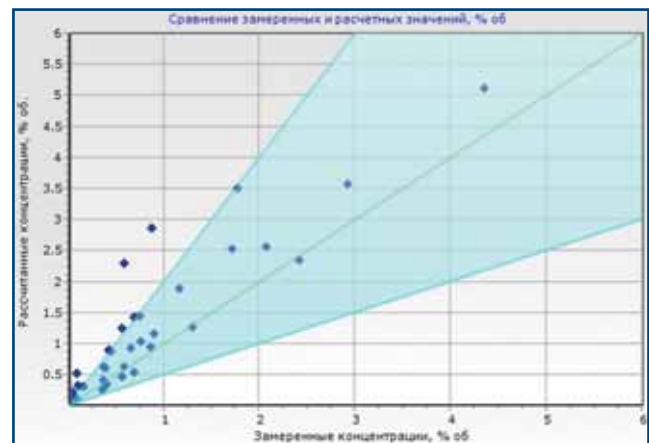
Название критерия (статистическая функция)	Формула	Пороговое значение (критерий удовлетворительного согласования эксперимента и опыта)
Среднее относительное отклонение MRB (Mean Relative Bias)	$MRB = \left\langle \frac{2(C_p - C_3)}{(C_p + C_3)} \right\rangle$	$-0,4 < MRB < 0,4$
Средняя относительная квадратичная ошибка MRSE (Mean Relative Square Error)	$MRSE = \left\langle \frac{4(C_p - C_3)^2}{(C_p + C_3)^2} \right\rangle$	$MRSE < 2,3$
Критерий FAC2	$FAC2 = \left\langle \frac{C_p}{C_3} \right\rangle$	$-0,5 \leq FAC2 \leq 2$
Среднее геометрическое отклонение MG (Geometric Mean Bias)	$MG = \exp \left\langle \ln \frac{C_p}{C_3} \right\rangle$	$0,67 < MG < 1,5$
Геометрическая дисперсия VG (Geometric variance)	$VG = \exp \left\langle \left(\ln \frac{C_p}{C_3} \right)^2 \right\rangle$	$VG < 3,3$

Примечание. C_p — значение расчетной концентрации; C_3 — значение измеренной концентрации; угловые скобки в формулах означают применение операции осреднения.

первому сценарию — полное мгновенное разрушение емкости, содержащей только газовую фазу. На рис. 6 представлены зависимости измеренной и расчетной концентраций в датчиках эксперимента TI-8 на высоте 0,4 м (координаты датчиков приведены в системе координат, ориентированной по направлению ветра), а на рис. 7 — сравнительный график максимальных расчетных и измеренных концентраций для 37 датчиков эксперимента TI-8 с мгновенным выбросом 3,97 т смеси газообразного фреона-12 с азотом (цветом показан диапазон, соответствующий пределам критериев приемлемости модели согласно ПОМ). Как видно из рис. 6, результаты расчетов достаточно хорошо согласуются с ре-



▲ Рис. 6. Профиль измеренной и расчетной концентраций в датчиках 4 (а) и 2 (б) в эксперименте TI-8
▲ Fig. 6. The profile of the measured and calculated concentrations in sensors 4 (a) and 2 (b) in TI-8 experiment



▲ Рис. 7. Сравнительный график максимальных расчетных и измеренных концентраций для 37 датчиков эксперимента TI-8
▲ Fig. 7. Comparative graph of maximum calculated and measured concentrations for 37 sensors of TI-8 experiment

зультатами экспериментов в «ближней» зоне и дают несколько завышенные результаты на расстояниях свыше 200 м от источника, что, скорее всего, можно связать с уходом облака с оси начального направления выброса под влиянием крупномасштабных пульсаций. Как видно из рис. 7, большинство экспериментальных точек лежит в пределах критерия приемлемости модели согласно ПОМ [19].

В табл. 5 приведены сравнительные данные по накопленным дозам для нескольких датчиков эксперимента TI-8. Как видно из табл. 5 и рис. 7, точность расчетов по модулю «Мастер-ТОХI» вполне удовлетворительна.

Следует обратить внимание, что согласование расчетных значений с экспериментальными в серии Thorney Island лучше, чем в серии Burgo и Coyote. Это объясняется тем, что в серии Thorney Island более достоверно известны условия и исходные

Таблица 5

Код и координаты датчика, м	Доза, кг·с/м ³		Относительное отклонение, %
	Расчет	Эксперимент	
2 (111,7; 34,49; 0,4)	5,00	6,00	18,2
3 (111,7; 34,49; 2,4)	1,80	1,30	32,3
4 (84,5; 61,73; 0,4)	3,60	6,60	58,8
5 (84,5; 61,73; 2,4)	1,30	1,90	37,5
8 (173,5; 68,99; 0,4)	3,10	2,70	13,8
9 (173,5; 68,99; 2,4)	1,20	1,00	18,2
10 (173,5; 68,99; 4,4)	0,46	0,31	39,0
16 (221,6; 55,38; 0,4)	3,00	3,40	12,5
42 (365,9; 14,53; 0,4)	2,00	2,20	9,5
46 (338,7; 81,68; 0,4)	1,80	1,70	5,7

данные по проведению эксперимента. Отчасти это вызвано тем, что в Thorney Island использовался чистый газ, распространение которого в окружающей среде связано с меньшим числом протекающих процессов, в частности, с отсутствием стадии растекания и испарения жидкой фазы.

Заключение

Рассмотрены основные функциональные возможности разработанной в ЗАО НТЦ ПБ БД натуральных экспериментов с выбросом «тяжелого» газа ТОХI+Verify, в которую включены данные зарубежных и отечественных научных источников. Показана возможность применения этой БД для верификации расчетного модуля «Мастер-ТОХI» в составе ПК ТОХI+Risk 5 и используемой в нем модели. Результаты расчетов, полученные в ПК ТОХI+Risk 5, показывают хорошее совпадение с результатами экспериментов. В отдельных случаях расчеты дают консервативную оценку, что связано с ограничениями руководства по безопасности [1] и консерватизмом рассматриваемых при моделировании сценариев, прежде всего с учетом изменений направления и скорости ветра в течение выброса.

Планируется, что БД ТОХI+Verify будет использоваться для дальнейшего совершенствования методического обеспечения моделирования рассеяния выбросов опасных веществ. Предполагается распространение разработанной БД на эксперименты, связанные не только с рассеянием, но и с другими физическими процессами: горением, взрывами, испарением пролива и т.д.

Список литературы

1. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ: рук. по безопасности. — Сер. 27. — Вып. 11. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. — 130 с.
2. Методика расчета распространения аварийных выбросов, основанная на модели рассеяния тяжелого газа/ А.А. Шаталов, М.В. Лисанов, А.С. Печеркин и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 9. — С. 46–52.
3. Сравнение результатов моделирования аварийных выбросов опасных веществ с фактами аварий/ С.И. Сумской,

К.В. Ефремов, М.В. Лисанов, А.С. Софьин// Безопасность труда в промышленности. — 2008. — № 10. — С. 42–50.

4. Верификация методик оценки последствий аварийных выбросов газа от источников продолжительного действия/ С.И. Сумской, А.В. Пчельников, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2005. — № 8. — С. 28–35.

5. Сравнительный анализ российских и зарубежных методик и компьютерных программ по моделированию аварийных выбросов и оценке риска/ Е.А. Агапова, Д.В. Дегтярев, М.В. Лисанов и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 9. — С. 71–78.

6. Агапова Е.А., Сумской С.И. Аналитический обзор математических моделей распространения облаков тяжелых газов// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 5. — С. 23–31.

7. Программно-аппаратный комплекс «ТОКСИ+Метео» для оценки последствий возможных аварий с учетом данных о текущих погодных условиях/ А.А. Агапов, И.О. Хлобыстова, С.Л. Марухленко и др.// Безопасность труда в промышленности. — 2011. — № 1. — С. 22–25.

8. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations/ S. Hanna, R. Britter, E. Argenta, J. Chang// Journal Hazardous Materials. — 2012. — Vol. 213–214. — P. 406–412.

9. Hanna S., Chang J., Huq P. Observed chlorine concentrations during Jack Rabbit I and Lyme Bay field experiments// Atmospheric Environment. — 2016. — Vol. 125. — P. 252–256.

10. McQuaid J. Objectives and design of the phase I heavy gas dispersion trials// Journal of Hazardous Materials. — 1985. — Vol. 11. — P. 1–33.

11. McQuaid J. Design of the thorney island continuous release trials// Journal of Hazardous Materials. — 1987. — Vol. 16. — P. 1–8.

12. McQuaid J., Roebuck B., Wilde D.G. Large scale field trials on dense vapour dispersion// Commission of the European communities indirect action programme «Safety of thermal water reactors». — Sheffield, 1985. — P. 179–189.

13. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report/ R.P. Koopman, J. Baker, R.T. Cederwall et al. — Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982. — Vol. 1, 2.

14. Coyote series data report. LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn and rapid-phase transitions/ H.C. Goldwire Jr., H.C. Rodean, R.T. Cederwall et al. — Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1983. — Vol. 1, 2.

15. Kohout A.J. Evaluation of fire dynamics simulator for liquefied natural gas vapor dispersion hazards. — Baltimore: Graduate School of the University of Maryland, 2011. — 497 p.

16. Hanna S.R., Strimaitis D.G., Chang J.C. Hazard response modelling uncertainty (a quantitative method): Evaluation of commonly-used hazardous gas dispersion models. — Westford: Sigma Research Corporation, 1993. — Vol. 2. — 338 p.

17. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials/ T.C. Brown, R.T. Cederwall, S.T. Chan et al. — Gas Research Institute, 1990.

18. *Desert Tortoise series data report: 1983 Pressurized ammonia spills*/ H.C. Goldwire Jr., T.G. McRae, C.W. Johnson et al. — Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985. — 244 p.

19. *Validation Database for Evaluating Vapor Dispersion Models for Safety Analysis of LNG Facilities, Guide to the LNG Model Validation Database Version 12*/ J.R. Steward, S. Coldrick, C.J. Lea et al. — The Fire Protection Research Foundation, 2016. — 116 p.

20. Хансен О., Ичарт М., Девис С. Валидация программного комплекса FLACS в части рассеяния газа при разливе сжиженного природного газа: Протокол оценки модели// Безопасность труда в промышленности. — 2015. — № 4. — С. 60–71.

degtiareva@safety.ru

Материал поступил в редакцию 23 мая 2018 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2018, № 6, pp. 35–44.
DOI: 10.24000/0409-2961-2018-6-35-44

Database of Full-Scale Experiments for Verification of the Mathematical Models of Dispersion of «Heavy» Gas Clouds

A.A. Agapov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Computational Analysis Center

V.V. Bannikov, Junior Researcher

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

E.A. Degtiareva, Researcher, degtiareva@safety.ru

Autonomous Noncommercial Organization «Industrial Risk Research Agency», Moscow, Russia

S.I. Sumskey, Cand. Sci. (Eng.), Senior Lecturer

NRNU MEPhI, Moscow, Russia

Abstract

Development of methods for modeling the dispersion of hazardous substances accidental release, improvement of the methodology for accidents risk assessment, implementation of tools for risk-oriented supervision in the field of industrial safety, and the following need for verification of the software tools and the methodological approaches used for risk assessment and modeling accidents at hazardous production facilities creates the necessity in the development of database of large full-scale experiments with the release of «heavy» gas. STC «Industrial Safety» CJSC has developed TOXI+Verify database, which includes data from foreign and domestic scientific reports making it possible to estimate the accuracy of the software complexes for modeling accidental releases for compliance with the experimental data. The parameters are given which describe both the series of experiments and each experiment, as well as the dynamics of the change in the concentration of hazardous substance and the temperature in the sensors. For the objective to verify the software designed to simulate the dispersion of emissions to the atmosphere, the command shell of TOXI+Verify database provides the possibility to call the calculation module «Master-TOXI» included in the scope of the calculation modules of TOXI+Risk 5 software package with automatic substitution of the parameters of the current experiment and saving the calcu-

lation results in the database. In general, the results of dispersion calculations with the experimental data for Burro, Coyote and Thorney Island experiments are well matched by several criteria, including those in the model assessment record. In some cases the calculations give the conservative estimate, which is related to the limitations of the methodology used to model the dispersion of hazardous substances accidental releases and some conservatism of the scenarios considered in the simulation.

Key words: database, experiment, verification, dispersion, «heavy» gas.

References

1. Methods for modeling the dispersion of hazardous substances accidental releases: Safety guide. Ser. 27. Iss. 11. Moscow: ZAO NTTs PB, 2016. 130 p. (In Russ.).

2. Shatalov A.A., Lisanov M.V., Pecherkin A.S., Pchel'nikov A.V., Sumskey S.I. Methods for calculating the dispersion of accidental releases based on the model of heavy gas dispersion. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2004. № 9. pp. 46–52. (In Russ.).

3. Sumskey S.I., Efremov K.V., Lisanov M.V., Sofin A.S. Comparison of the simulation results of hazardous substances accidental releases with the facts of accidents. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2008. № 10. pp. 42–50. (In Russ.).

4. Sumskey S.I., Pchel'nikov A.V., Lisanov M.V., Pecherkin A.S., Shargatov V.A. Verification of methods for assessing the consequences of emergency gas emissions from the long-term sources. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2005. № 8. pp. 28–35. (In Russ.).

5. Agapova E.A., Degtyarev D.V., Lisanov M.V., Kryukov A.S., Kulberg S.B., Sumskey S.I. Comparative analysis of the Russian and foreign methods and computer programs on simulation of emergency emissions and risk assessment. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 9. pp. 71–78. (In Russ.).

6. Agapova E.A., Sumskey S.I. Analytical review of the mathematical models of dispersion of heavy gas clouds. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 5. pp. 23–31. (In Russ.).

7. Agapov A.A., Khlobystova I.O., Marukhlenko S.L., Marukhlenko A.L., Sofin A.S. TOXI+Meteo software and hardware complex for assessment of the consequences of possible accidents taking into account data on the current weather conditions. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2011. № 1. pp. 22–25. (In Russ.).

8. Hanna S., Britter R., Argenta E., Chang J. The Jack Rabbit chlorine release experiments: Implications of dense gas removal from a depression and downwind concentrations. *Journal Hazardous Materials*. 2012. Vol. 213–214. pp. 406–412.

9. Hanna S., Chang J., Huq P. Observed chlorine concentrations during Jack Rabbit I and Lyme Bay field experiments. *Atmospheric Environment*. 2016. Vol. 125. pp. 252–256.

10. McQuaid J. Objectives and design of the phase I heavy gas dispersion trials. *Journal of Hazardous Materials*. 1985. Vol. 11. pp. 1–33.

11. McQuaid J. Design of the thorney island continuous release trials. *Journal of Hazardous Materials*. 1987. Vol. 16. pp. 1–8.

12. McQuaid J., Roebuck B., Wilde D.G. Large scale field trials on dense vapour dispersion. Commission of the European communities indirect action programme «Safety of thermal water reactors». Sheffield, 1985. pp. 179–189.

13. Koopman R.P., Baker J., Cederwall R.T., Goldwire Jr. H.C., Hogan W.J., Kamppinen L.M., Kiefer R.D., McClure J.W., McCrae T.G., Morgan D.L., Morris L.K., Spann Jr. M.W., Lind C.D. LLNL/NWC 1980 LNG spill tests. Burro series data report. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1982. Vol. 1, 2.

14. Goldwire Jr. H.C., Rodean H.C., Cederwall R.T., Kansa E.J., Koopman R.P., McClure J.W., McCrae T.G., Morris L.K., Kamppinen L., Kiefer R.D. Coyote series data report. LLNL/NWC 1981 LNG spill tests dispersion, vapor burn and rapid-phase transitions. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1983. Vol. 1, 2.

15. Kohout A.J. Evaluation of fire dynamics simulator for liquefied natural gas vapor dispersion hazards. Baltimore: Graduate School of the University of Maryland, 2011. 497 p.

16. Hanna S.R., Strimaitis D.G., Chang J.C. Hazard response modelling uncertainty (a quantitative method): Evaluation of commonly-used hazardous gas dispersion models. Westford: Sigma Research Corporation, 1993. Vol. 2. 338 p.

17. Brown T.C., Cederwall R.T., Chan S.T., Ermak D.L., Koopman R.P., Lamson K.C., McClure J.W., Morris L.K. Falcon series data report: 1987 LNG vapor barrier verification field trials. Gas Research Institute, 1990.

18. Goldwire Jr. H.C., McCrae T.G., Johnson C.W., Hipple D.L., Koopman R.P., McClure J.W., Morris L.K., Cederwall R.T. Desert Tortoise series data report: 1983 Pressurized ammonia spills. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1985. 244 p.

19. Steward J.R., Coldrick S., Lea C.J., Gant S.E., Ivings M.J. Validation Database for Evaluating Vapor Dispersion Models for Safety Analysis of LNG Facilities, Guide to the LNG Model Validation Database Version 12. The Fire Protection Research Foundation, 2016. 116 p.

20. Khansen O., Ichart M., Devis S. Validation of FLACS software package in terms of gas dispersion in case of LNG spill: Model assessment record. *Bezopasnost v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2015. № 4. pp. 60–71. (In Russ.).

Received May 23, 2018

По страницам научно-технических журналов

июнь 2018 г.

Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья (научный информационный сборник)

Оценка прочности полимерных армированных трубопроводов/ А.В. Хабибуллин, А.С. Глазков, Д.А. Гулин, М.Э. Дусалимов. — 2017. — № 6.

Разработана трехмерная нелинейная модель механического поведения полимерных армированных труб (ПАТ), учитывающая параметры структуры, контактное взаимодействие, нелинейное деформирование компонентов. Модель позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние ПАТ при различных условиях нагружения. Выполнено исследование влияния конструктивных параметров ПАТ на несущую способность трубопровода. Произведен расчет напряжений, возникающих в ПАТ различных диаметров при разных условиях нагружения.

Исламов Р.Р., Агиней Р.В., Исупова Е.В. Анализ средств и методов мониторинга напряженного состояния подземных магистральных нефтегазопроводов, работающих в сложных инженерно-геологических условиях. — 2017. — № 6.

Приведены результаты исследования влияния опасных гидрогеологических явлений на безопасность эксплуатации, надежность и работоспособность магистральных нефтегазопроводов. Предложенная классификация средств и методов оценки напряженно-деформированного состояния стенок трубопроводов позволяет выделить две группы методов: измерение пространственного положения и расчет напряжений и непосредственное

измерение напряжений в стенках труб. Указаны достоинства и недостатки рассматриваемых методов. Обоснована необходимость реализации мероприятий по мониторингу продольных напряжений в стенках магистральных нефтегазопроводов с использованием волоконно-оптических сенсоров.

Напряженно-деформированное состояние газопровода на пересечениях с геодинамическими зонами по данным неоднократной внутритрубной дефектоскопии/ Б.Н. Мастобаев, Р.М. Аскараров, С.В. Китаев и др. — 2017. — № 6.

Анализ результатов обследований магистральных газопроводов средствами внутритрубной дефектоскопии, способными измерять фактические радиусы изгиба, показал, что земные блоки в геодинамических зонах перемещаются в плоскости изгиба, увлекая за собой трубопровод, при этом возникают ненормативные радиусы изгиба. Показано, что места наибольшей концентрации аварий (около 90 %) приходятся на зоны влияния активных геодинамических зон. В качестве критериев ненормативных радиусов изгиба приняты 500D и более, при которых трубная сталь К60 сохраняет упругие свойства, т.е. напряжения изгиба выше нормативных маловероятны при радиусе изгиба 250D и менее, при котором изгибные напряжения имеют величину, близкую к пределу текучести трубной стали, что в соответствии с нормативами недопустимо. Установлено, что на пересечениях с геодинамическими зонами происходят процессы, влияющие на величину радиуса изгиба трубопровода и, соответственно, на его напряженно-деформированное состояние, например, количество участков с радиусом изгиба менее 500D возросло с 80 (33 года) до 128 (35 лет), т.е. на 60 %.