

УДК 504.3:622.691.4

**А.В. Завгороднев**, к.т.н., генеральный директор, ООО «Газпром трансгаз Ставрополь»;**Г.С. Аكوпова**, к.т.н., начальник лаборатории охраны окружающей среды и ресурсосбережения;**Н.С. Толстова**, ООО «Газпром ВНИИГАЗ»; **А.В. Мельников**, заместитель начальника отдела хранения СПГ и газового конденсата, ООО «Газпром добыча шельф»

# РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАССЕИВАНИЯ В АТМОСФЕРЕ ОРГАНИЗОВАННЫХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВЫБРОСОВ ГАЗА НА ОБЪЕКТАХ ГАЗОТРАНСПОРТНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

*В статье рассматриваются результаты исследования по определению фактического рассеивания природного газа (метана) при продувках и стравливании из технологического оборудования объектов ООО «Газпром трансгаз Ставрополь» в полевых условиях.*

Для анализа залповых выбросов были организованы и проведены специальные измерения (1).

Потенциальными источниками организованных залповых выбросов природного газа в окружающую среду являются объекты линейной части магистрального газопровода (ЛЧ МГ), компрессорных станций (КС), газораспределительных станций (ГРС), газоизмерительных станций (ГИС).

Работа технологического оборудования сопровождается поступлением в атмосферу природного газа от КС и линейной части газопровода в процессе:

- выбросов природного газа, расходуемого на технологические нужды КС (работа турбодетандеров, продувка контуров, импульсный газ на управление и силовой привод запорной арматуры и устройств КИПиА, продувки при работе и стравливание при обслуживании и ремонте);

- выбросов природного газа, расходуемого на технологические нужды линейной части МГ (расход газа при планово-предупредительных ремонтах и замене арматуры труб, продувке участков трубопроводов);

- выбросов на ГРС. В таблице 1 приведены данные по участкам газопроводов и результаты расчетов залповых выбросов метана в процессе стравливания и продувки технологического оборудования МГ.

При организации и проведении экспериментальных работ учитывались:

- особенности района расположения объектов исследования (наличие фоновых источников выбросов углеводородов (УВ), предприятий, автодорог);

- метеорологические условия района, климатическая характеристика района расположения обследуемого предприятия. Данные по среднегодовым и

среднемесячным скоростям ветра, повторяемости ветра;

- данные по направлениям, статистическим характеристикам температуры, изменчивости температуры и давления по месяцам;

- рельеф местности;

- геометрическое описание источника выделения и источника выброса (объем продуваемого оборудования, диаметр свечи, длина продуваемого участка и др.);

- расположение промплощадок обследуемых объектов и прилегающих к ним территорий, включающих участки основных (и фоновых) источников выброса в атмосферу природного газа;

- фоновые величины концентраций загрязняющих веществ (ЗВ).

На первом этапе работ после рекогносцировки на местности проводился предварительный ориентировочный выбор наиболее удобных точек на местности.

Таблица 1. Исходные данные и результаты расчетов залповых выбросов метана для участка МГ

Длина участка	Диаметр трубы	Тип операции	V	Время t	Частота n	Начальное давление P <sub>1</sub>	Конечное давление P <sub>2</sub>	Начальная температура T <sub>1</sub>	Конечная температура T <sub>2</sub>	Коэффициент сжимаемости газа Z <sub>1</sub>	Коэффициент сжимаемости газа Z <sub>2</sub>	Объем V <sub>стр</sub>	Объем газа в единицу времени V <sub>1</sub>	Максимальный выброс от каждой свечи G	Выброс метана M	Sum(M)
км	мм		м <sup>3</sup>	час	раз/год	МПа	МПа	К	К			м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /с	г/с	т/г	т/г
23,0	1020	стравливание	18784,4	3	1	5,5	-	284	-	0,862	-	1221105,0	113,07	39007,52	842,6	855,90
		продувка		2	1	0,2013	0,1013	283	278	0,995	0,997	19324,4	2,68	1851,92	13,3	
20,0	1020	стравливание	16334,3	3	1	5,5	-	284	-	0,862	-	1061830,4	98,32	33919,58	732,7	744,26
		продувка		2	1	0,2013	0,1013	283	278	0,995	0,997	16803,8	2,33	1610,36	11,6	
14,0	1020	стравливание	11434,0	2	1	5,5	-	284	-	0,862	-	743281,3	103,23	35615,56	512,9	520,98
		продувка		2	1	0,2013	0,1013	283	278	0,995	0,997	11762,7	1,63	1127,25	8,1	
24,0	1020	стравливание	19601,1	3	1	5,5	-	284	-	0,862	-	1274196,5	117,98	40703,50	879,2	893,06
		продувка		2	1	0,2013	0,1013	285	278	0,995	0,997	20087,6	2,79	1925,07	13,9	

Предусматривалось размещение измерительных приборов на подветренной стороне от источника выброса, размещение в точках, где можно получить наиболее качественные данные о приземных концентрациях. Контроль загрязнения атмосферы выполнялся на расстоянии 50–3000 м от источника выброса.

Примерно за 40 минут до начала продувки (стравливания) газа проверялись и размещались приборы контроля. Измерения производились с максимальной возможной частотой и одновременной регистрацией моментов времени.

При определении мест размещения измерительных приборов применен подход, использованный при определении мест размещения измерительной сети при разработке проекта системы мониторинга атмосферы ООО «Газпром добыча Астрахань».

На рисунке 1 приведен пример предварительного расчета для определения

оптимальных мест размещения измерительных приборов. При этом применялась версия 6.6 унифицированной модели дисперсии (UDM), входящая в пакет программ DNV PHAST 6.6.

Важно подчеркнуть, что данная модель учитывает непостоянство направления ветра во время истечения газа, что приводит к увеличению ширины облака и уменьшению максимальных значений концентрации природного газа. При движении облака метана моделью предусматривается краткосрочное из-

менение направления ветра каждые 18,75 с, с сохранением интегрального направления движения облака.

Показаны максимально возможные концентрации в предполагаемой точке замера. Согласно статистическим данным, средняя скорость ветра в Ставропольской области для данного периода года составляет 2,5 м/с. Результатами расчета установлено, что при такой скорости ветра облако выбросов коснется земли на расстоянии около 500 м, что и определило выбор точек для измерений

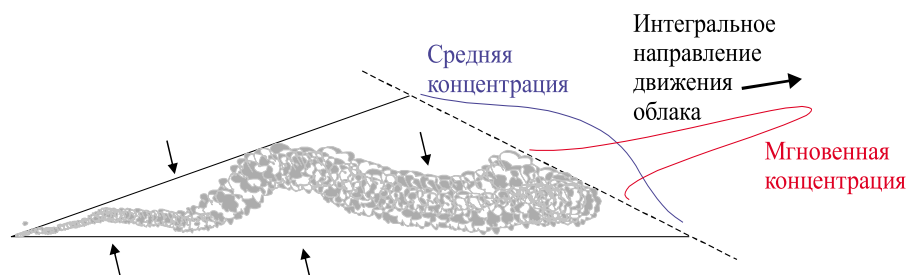


Рис. 1. Принцип усреднения концентрации облака при его дрейфе с учетом изменения направления ветра

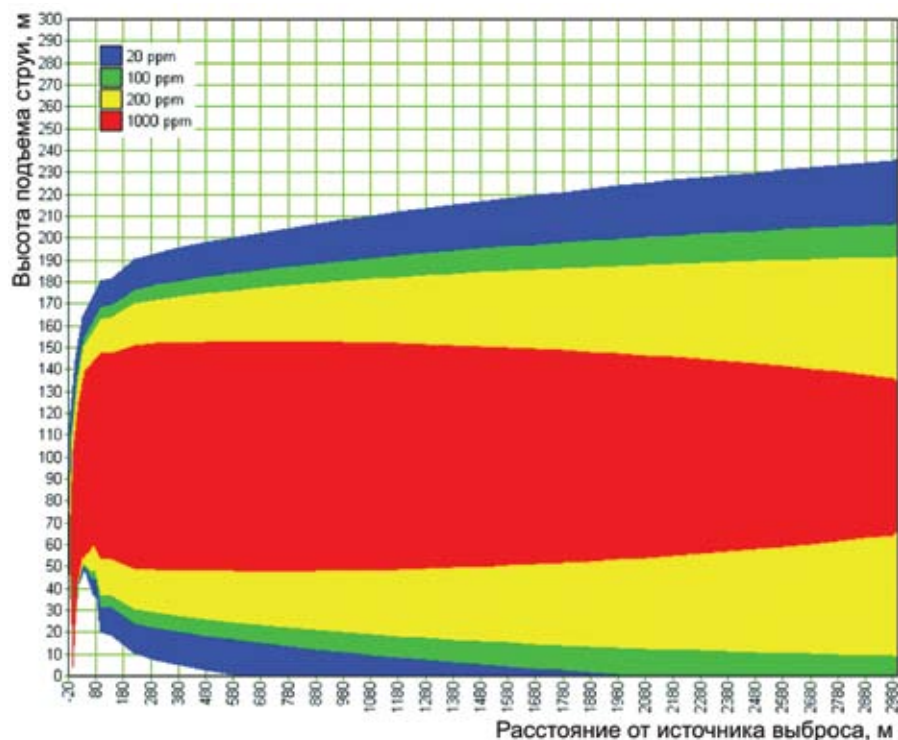


Рис. 2. Расчетные изолинии концентраций природного газа при выбросе из свечи при массовом расходе 39 кг/с (сечение облака природного газа вдоль оси его распространения)

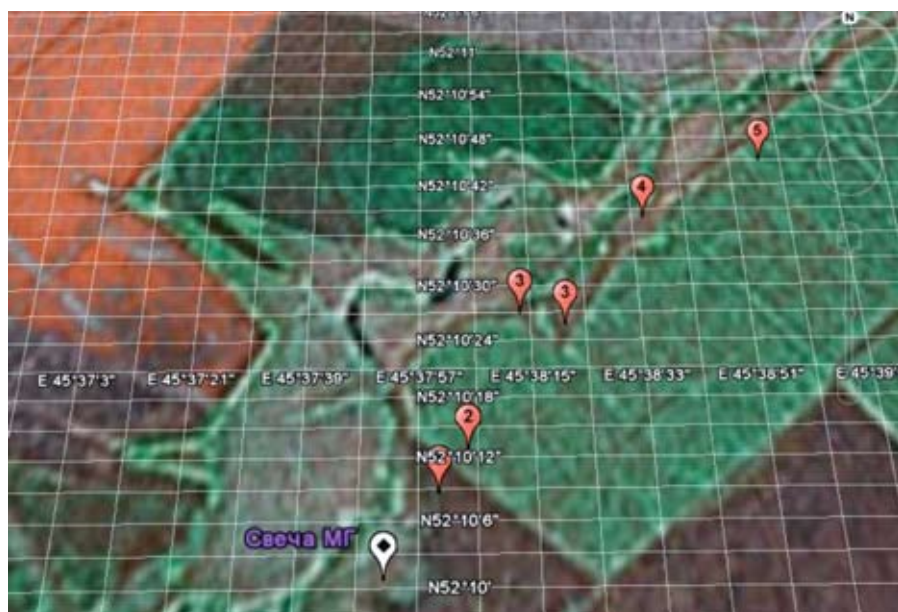


Рис. 3. Схема расстановки точек постов наблюдений на местности

Таблица 2. Данные по точкам измерений и приборам контроля (источник – свеча МГ)

№ точки	Расстояние от источника, м	Координаты		Используемый прибор
		Широта	Долгота	
1	350	С: 52° 10' 8,63"	В: 45° 38' 0,09"	Inspectra Laser
2	563	С: 52° 10' 12,70"	В: 45° 38' 4,55"	CATEX 3
3	1042	С: 52° 10' 27,03"	В: 45° 38' 13,32"	Экологическая лаборатория ЦЛАТИ
3	1173	С: 52° 10' 25,68"	В: 45° 38' 20,60"	
4	1758	С: 52° 10' 38,03"	В: 45° 38' 34,91"	Экологическая лаборатория ЦЛАТИ (ФГУ «Центр лабораторного анализа и технических измерений по Центральному федеральному округу»)
5	2412 м	С: 52° 10' 45,02"	В: 45° 38' 56,24"	GX-2003

на свече магистрального газопровода – 300 м, 500 м, 1 км, 2 км (рис. 2). Далее места измерений уточнялись на местности исходя из условий рельефа, наличия автодорог и т.п.

Для определения реальных координат измерительных приборов использовались приборы GPS. Учитывая сложности организационной подготовки к эксперименту, в некоторых случаях была сделана расстановка измерительных приборов не точно по заранее подготовленной схеме, которая затем корректировалась, а измерение их координат проводилось уже после эксперимента.

Измерения концентраций метана с помощью подвижных средств (автомашин и др.) проводились на высотах 1,5–2,5 м над подстилающей поверхностью.

Коррекция положения рабочей точки производилась в соответствии с возможным изменением направления ветра – распространением шлейфа выбросов при уточнении метеопараметров.

Метеорологические инструментальные измерения и визуальные наблюдения проводились синхронно с измерениями концентраций с последующей синхронизацией данных о концентрациях и метеорологических характеристиках. В течение отбора пробы в точке контроля фиксировались следующие метеопараметры: атмосферное давление, температура, относительная влажность, направление и скорость ветра. Все измерения проводились на высоте 1,5–2,0 м от уровня земли.

Результатом эксперимента являлись массивы замеров концентраций на каждом посту с частотой, которую позволяли реализовать используемые приборы. Обработка данных проводилась по завершении замеров на компьютере. Свеча, на которой проводился эксперимент, находится на участке кранового



узла, располагается на открытом и относительно ровном участке местности. Параметры свечи: высота – 3,6 м, диаметр – 300 мм.

Начальное давление на участке – 4,0 МПа, длина стравливаемого участка – 25 км, диаметр трубопровода – 1020 мм.

По данным GPS-навигатора были определены координаты свечи: широта С: 52° 10' 0,71», долгота В: 45° 37' 52,03».

В соответствии с направлением ветра и предварительными расчетами, было выставлено пять постов наблюдений (табл. 2, рис. 3). Точки постов наблюдений на рисунке 3 показаны номерами 1–5.

Перед стравливанием проводились фоновые замеры концентрации метана и метеопараметров (43 мин.). Результаты замеров фоновой концентрации метана показаны на рисунке 4, а метеопараметров – в таблице 3 (точка 3).

Фоновые концентрации, как показано на графике, находились в диапазоне 2,34– 3,79 ppm. На рисунках 5 и 6 показаны изменения направления и скорости ветра. В среднем в период фоновых замеров концентрации метана

Таблица 3. Данные замеров метеопараметров в период стравливания (свеча МГ)

	Температура, °С	Влажность, %	Давление, mbar (мм.рт.ст.)
Фон	17,53	61	996–1006 (747,06–754,56)
Замер	17,75	61	1006 (754,56)

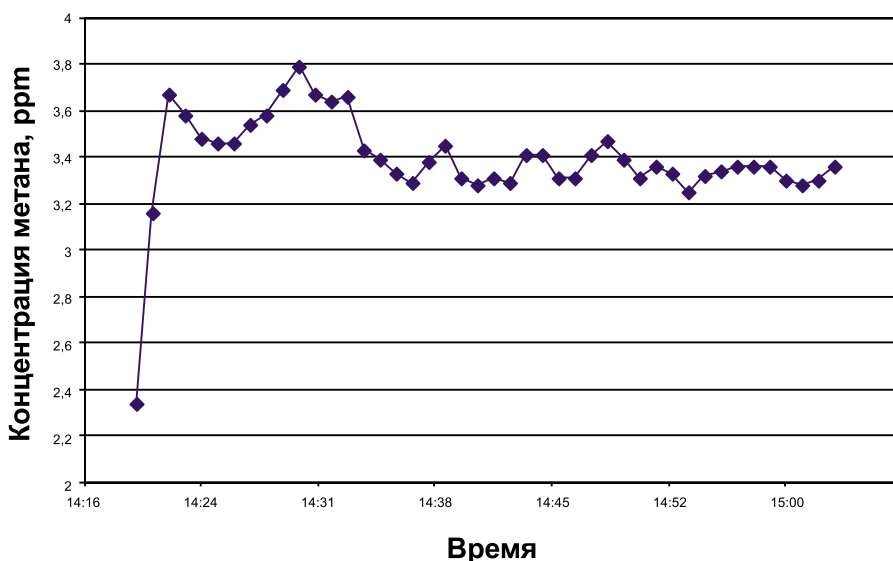


Рис. 4. Фоновые значения концентрации метана в атмосфере при стравливании газа через свечу МГ

направление ветра варьировалось от 168 до 227 градусов, скорость ветра составляла от 2,1 до 5,1 м/с.

На рисунках 7-8 приведены данные по изменению направления и скорости ветра в период эксперимента по



**ОЗНА**

**КОМПЛЕКСНЫЕ РЕШЕНИЯ  
ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ |  
ПРОИЗВОДСТВО ОБОРУДОВАНИЯ | ИНЖИНИРИНГ |  
СЕРВИСНОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ | АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБЪЕКТОВ |



**ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ПРОИЗВОДСТВО,  
ПОСТАВКА, ВВОД В ЭКСПЛУАТАЦИЮ:**

- Оборудование для измерения продукции скважин
- Оборудование для систем поддержания пластового давления
- Оборудование для систем подготовки и перекачки нефти, воды и газа
- Блочно-модульные автоматизированные установки предварительного сброса, подготовки и закачки пластовой воды
- Аппаратура управления
- Запасные части к буровым насосам
- Запасные части к измерительному оборудованию
- Узлы учета (коммерческие и оперативные) нефти, нефтепродуктов, газа и воды
- Противопожарное оборудование
- Запорная и трубопроводная арматура

**ПРЕДОСТАВЛЯЕМЫЕ УСЛУГИ:**

- Монтаж, пуско-наладка
- Гарантийное и постгарантийное обслуживание
- Капитальный ремонт и модернизация АГЗУ
- Техническое обслуживание
- Определение газового фактора на опорных скважинах месторождений
- Строительство инженерных систем кустовых площадок
- АСУ ТП

**ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗЫСКАНИЯ  
ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ  
ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ РАБОТЫ**

**WWW.OZNA.RU**

452600, Башкортостан, г. Октябрьский, ул. Северная, 60, тел/факс (34767) 4-05-76, e-mail: [ozna@ozna.ru](mailto:ozna@ozna.ru)

**Центр технической поддержки (347) 246-01-08 (09)**

[www.ozna.ru/forum](http://www.ozna.ru/forum)

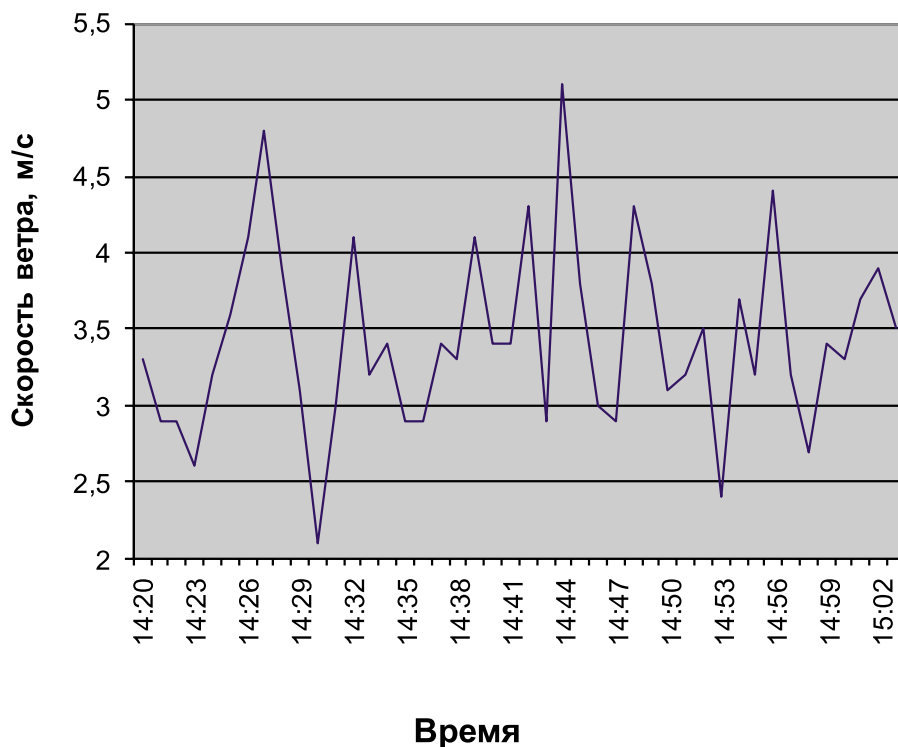


Рис. 5. Скорость ветра в период фоновых замеров метана в атмосфере (свеча МГ)

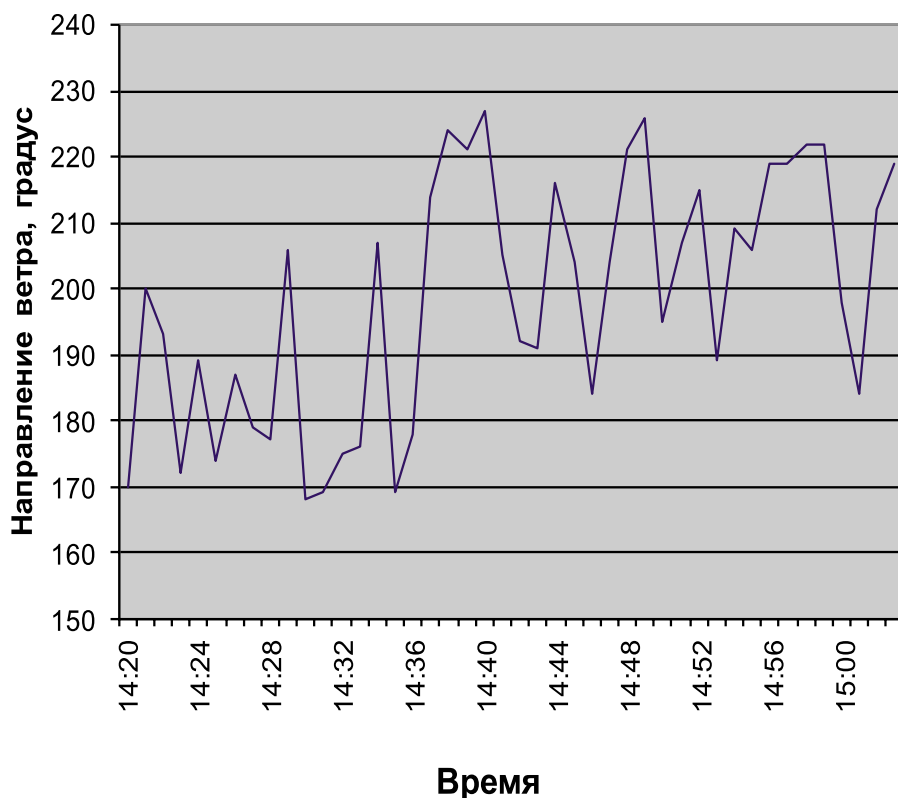


Рис. 6. Направление ветра в период фоновых замеров метана в атмосфере (свеча МГ)

стравливаю газа из свечи МГ. Замеры проводились в течение 1 часа 50 минут после начала стравливания. Показания приборов и метеопараметры во время опыта записывались 1 раз в минуту. В период стравливания скорость ветра варьировалась от 1,3 до 4,3 м/с.

На рисунках 9–10 приведены замеры концентрации метана по точкам постов наблюдений. Период нулевых концентраций соответствует проезду машины на новый пункт измерений. Замер на расстоянии 536 м (точка 2) проводился с исполь-

### Направление ветра в период замеров 1.10

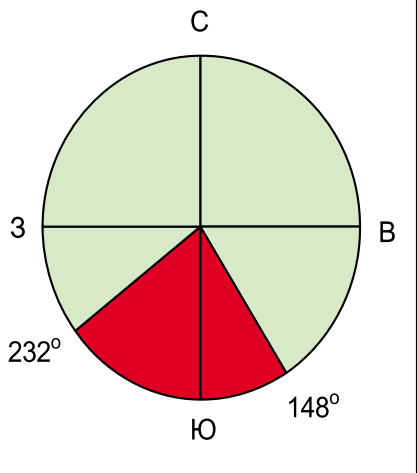


Рис. 7. Изменение направления ветра в период стравливания газа через свечу МГ

зованием прибора CATEX-3, нижняя граница показаний которого – 50 ppт. Зафиксированы только два значения 70 ppт, концентрации на этом расстоянии соответствовали 0–50 ppт. Во время измерений фиксировалось входное и выходное давление на участке газопровода (рис. 11). Все результаты замеров концентраций метана по точкам постов наблюдений приведены на рисунке 12. Было проведено два замера концентрации метана по окончании стравливания (через 2 часа 22 минуты) на расстоянии 32 и 79 м от свечи, в течение 3 минут с записью результатов через каждые 5 секунд (рисунки 13–14). Для сравнения результатов эксперимента с расчетами по ОНД-86 выполнены расчеты рассеивания для источников, на которых проводились исследования.

### ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РАСЧЕТА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ

Расчеты загрязнения атмосферы выбросами метана проведены на персональном компьютере с использованием унифицированной программы (УПРЗА) «Эколог» (версия 3.02), разработанной НПО «Интеграл» (г. Санкт-Петербург). Алгоритмы программных элементов реализуют зависимости и положения ОНД-86. Посредством программы «Эколог» определяются разовые (осредненные за

20–30-минутный интервал) концентрации загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы при различных скоростях и направлениях ветра.

Расчеты загрязнения атмосферы выбросами от источников залповых выбросов промплощадок выполнялись в принятом расчетном прямоугольнике в условной системе координат, обозначенной «основной». Координаты сторон расчетного прямоугольника для объектов исследований –  $X_1 = 0$  м,  $Y_1 = 1000$  м;  $3000$  м,  $X_2 = 1000$  м;  $3000$  м,  $Y_2 = 1000$  м;  $3000$  м; ширина расчетного прямоугольника  $Z = 2000$  м;  $6000$  м; шаг расчетной сетки  $50$  м,  $100$  м.

В расчетах учтены залповые выбросы метана при стравливании и продувках газопровода.

При выполнении расчетов использовались следующие управляющие параметры программы «Эколог»:

**а) признак задания скорости ветра:**

- скорость задается в м/с. В расчетах включены две скорости ветра:  $0,5$  м/с (штилевое условие) и  $U^*$  – средняя максимальная, а также проводился перебор скоростей в соответствии с полученными в экспериментах;

- скорость задается в долях от средне-взвешенной опасной скорости ветра:  $0,5, 1,0, 1,5$  от  $U$ . В расчетах проводился перебор скоростей в соответствии с полученными в экспериментах;

**б) признак перебора направлений ветра:** перебор направлений ветра производится от  $0$  до  $360$  градусов с шагом  $10$  градусов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ МЕТАНА

Расчет величин залповых выбросов по объектам исследований, на которых проводились измерения, приведены в таблице 4.

Анализ результатов расчетов основан на сравнении приземных концентраций, рассчитанных по ОНД-86, и экспериментальных данных.

В таблице 5 на примере выходного газопровода проведено сравнение результатов эксперимента с расчетными данными с учетом 30-минутного осреднения.

При осреднении данные по концентрации метана, полученные экспериментально, значительно ниже рас-

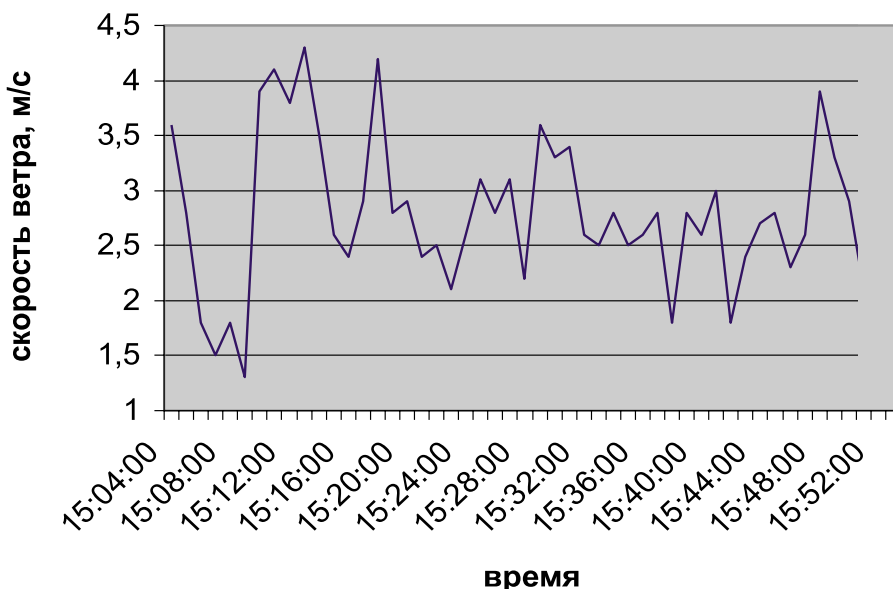


Рис. 8. Изменение скорости ветра при стравливании газа через свечу МГ

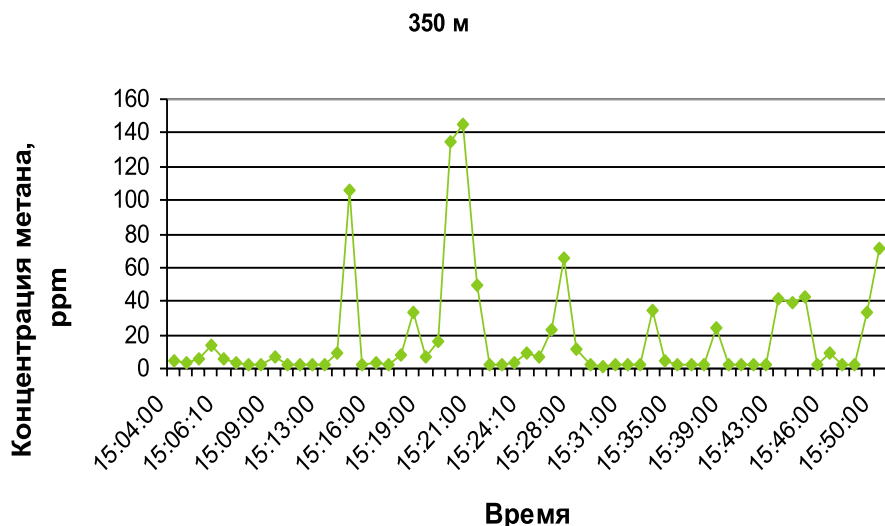


Рис. 9. Замер концентрации метана в атмосфере с расстояния 350 м (точка 1 – свеча МГ)

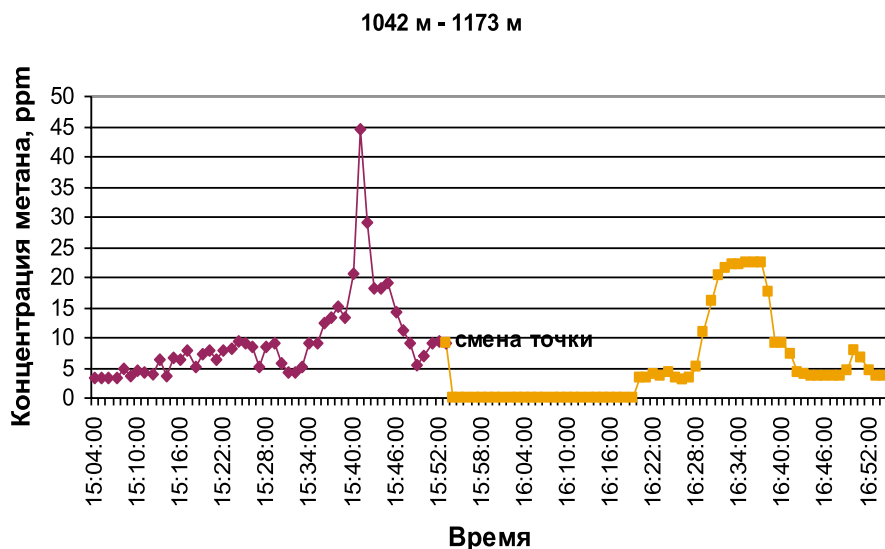


Рис. 10. Замер концентрации метана в атмосфере с расстояния 1042 и 1173 м (точка 3 – свеча МГ)

Падение давления на свече

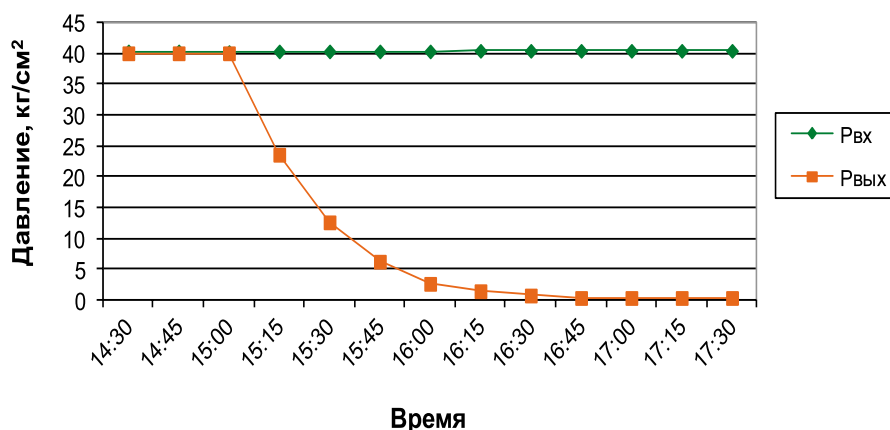


Рис. 11. Данные по изменению давления при стравливании газа через свечу МГ

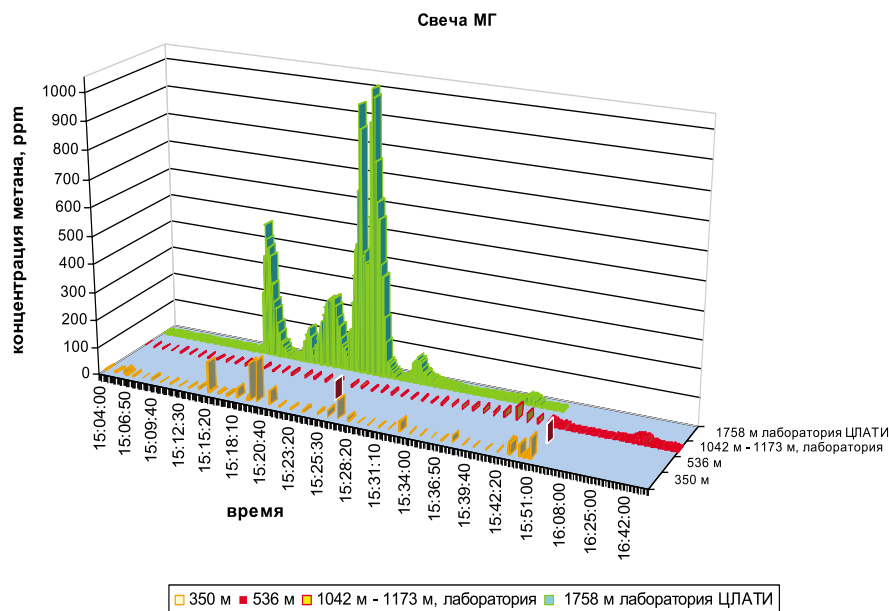


Рис. 12. Концентрации метана в атмосфере при стравливании газа из свечи МГ на различных расстояниях

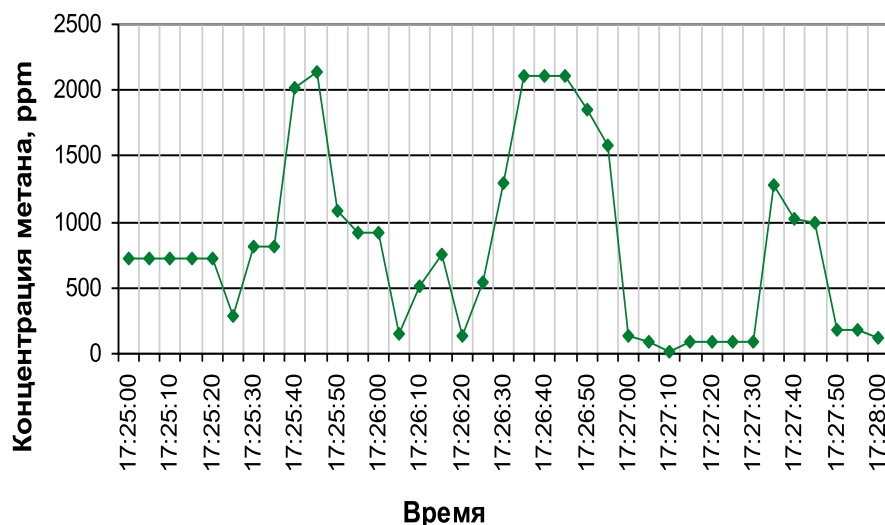


Рис. 13. Динамика изменения концентрации метана в атмосфере при прекращении стравливания газа через свечу МГ на расстоянии 32 м

четных, т.е. меньше в 10 раз, что еще раз доказывает, что методика ОНД-86 неприменима для расчетов залповых выбросов.

Как видно из таблицы 5, расчетные концентрации метана, полученные с помощью программного комплекса PHAST, существенно лучше согласуются с данными эксперимента, чем концентрации, рассчитанные по методике ОНД-86. Это создает предпосылки для преимущественного использования комплекса PHAST и модели UDM для расчета концентраций загрязняющих веществ, создаваемых при залповых выбросах на газотранспортных объектах.

Проведенные экспериментальные исследования являются первой попыткой в отечественной отрасли оценить экспериментально уровень приземной концентрации метана в ходе стравливания природного газа из оборудования высокого давления.

Получены экспериментальные результаты для двух видов свечей: с вертикальным выходом газа и горизонтальным.

Для свечей с вертикальным выходом экспериментально подтвержден принципиально важный вывод о достижении шлейфом выброса природного газа поверхности земли, несмотря на звуковые вертикальные скорости выхода газа из свечи и плавучесть метана в воздухе за счет существенно меньшей плотности.

Полученные численные результаты показали, что приземные концентрации увеличиваются с увеличением мощности выброса (т.е. с увеличением диаметра и давления в газопроводе) и могут превышать ОБУВ в сотни раз и более.

Поскольку одновременно с измерением концентраций проводилась регистрация метеоусловий, полученные экспериментальные данные могут быть использованы для параметризации разрабатываемой математической модели рассеяния метана при его стравливании через свечи из оборудования высокого давления.

## ВЫВОДЫ

Проведены экспериментальные исследования в полевых условиях, которые являются первой попыткой в отечественной отрасли оценить экс-



периментально уровень приземной концентрации метана в ходе стравливания природного газа из оборудования высокого давления.

Расчетные концентрации метана, полученные с помощью программного комплекса PHAST, согласуются с данными эксперимента. Это создает предпосылки для преимущественного использования комплекса PHAST и модели UDM для расчета концентраций загрязняющих веществ, создаваемых при залповых выбросах на газотранспортных объектах.

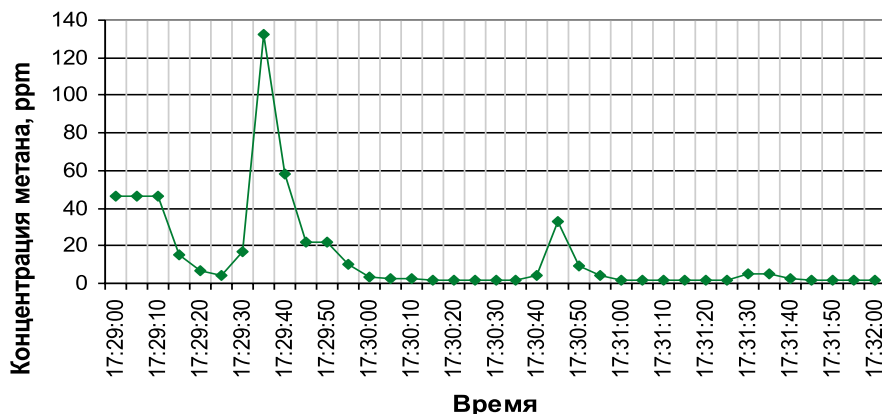


Рис. 14. Динамика изменения концентрации метана в атмосфере при прекращении стравливания газа через свечу МГ на расстоянии 79 м

Таблица 4. Расчетные данные залповых выбросов метана для участков газопроводов при стравливании (фактическое время стравливания)

Длина участка	Диаметр трубы	Геометрический объем источника, V	Время стравливания, t	Начальное давление, P <sub>1</sub>	Среднеарифметическое абсолютное давление газа, P <sub>ср</sub>	Температура газа, T	Коэффициент сжимаемости газа, Z	Объем газа, стравливаемый за 1 операцию, V <sub>стр</sub>	Объемный расход выброса природного газа, V <sub>1</sub> / V <sub>ср.</sub>	Мощность выброса, M/ M <sub>ср</sub>
км	мм	м <sup>3</sup>	сек	МПа	МПа	К		м <sup>3</sup>	м <sup>3</sup> /с	г/с
25,0	1020	20417,9	6600	4	4,1013	280	0,887	985842,35	149,37/ -	103065,337/ -
+0,334	720	135,9	612	4,4	4,5013	280	0,887	7119,78	11,634/ 3,955	8027,2/ 2729,24

Таблица 5. Сравнение рассчитанных концентраций метана с полученными в условиях эксперимента по стравливанию газа из газопровода

Расстояние, м	Данные по концентрации, мг/м <sup>3</sup>		
	ОНД-86 (осреднение за 30 мин.)	PHAST (осреднение за 30 мин.)	Экспериментальные средние значения
300	53,5	3,08	4,75
520	54	4,79	3,25
1000	42	9,54	7,26

\* осреднение экспериментальных данных проводилось по формуле:

$$C_{\text{ср}} = \frac{C_1 \cdot t_1 + C_2 \cdot t_2 + \dots + C_n \cdot t_n}{t}$$

где C<sub>n</sub> – концентрация при замере, мг/м<sup>3</sup>;  
t<sub>n</sub> – время замера показателей;  
t – общее время проведения замеров, сек.

#### Литература:

1. Аكوпова Г.С., Ганага С.В., Толстова Н.С. Проблемы моделирования рассеивания залповых выбросов загрязняющих веществ (природного газа) в атмосфере // Трубопроводный транспорт. Теория и практика. 2010. №1 (17).
2. Филатова Е.Н. Моделирование загрязнения атмосферы по оперативным данным. Дисс. канд. физ.-мат. наук. – Санкт-Петербург, 2005, с. 100.
3. Гриценко А.И., Максимов В.М., Самсонов Р.О., Аكوпова Г.С. Экология: нефть и газ. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2009.
4. Максимов В.М., Розенберг Г.Д., Исаев В.И., Лимар Е.Е. Теоретические основы прогнозирования последствий аварий на газо- и конденсатопроводах // Защита от коррозии и охрана окружающей среды. 1995. № 5. с. 8–15.
5. Максимов В.М., Розенберг Г.Д., Исаев В.И. и др. Методические рекомендации по расчету параметров выброса газовой смеси и ее рассеивания в атмосфере при аварийных разрывах газопроводов. – М.: ВНИИГаз, 1992, с. 64.

**Ключевые слова:** рассеивание, атмосфера, залповый выброс, газопровод, концентрация.