

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

На правах рукописи

САУЦ Артур Валерьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНОГО ВОЗДУШНОГО РЕЖИМА
ЗДАНИЙ, РАСПОЛОЖЕННЫХ ВБЛИЗИ ПОЛИГОНОВ ТВЁРДЫХ БЫТОВЫХ
И ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ**

Специальности: 05.23.03 – «Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование
воздуха, газоснабжение и освещение»

03.02.08 – «Экология (в строительстве и ЖКХ)»

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель
д. т. н., проф. Дацюк Т.А.

Санкт-Петербург – 2014

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВБРОСАМИ БИОГАЗА С ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО.....	11
1.1 Существующие методики расчёта загрязнения воздуха биогазом в зо- нах влияния полигонов ТБО и ПО.....	11
1.2 Методики расчёта эмиссии биогаза с полигонов ТБО и ПО.....	16
1.3 Обзор результатов натурных обследований состояния воздушной среды в местах расположения полигонов.....	21
1.4 Утилизация биогаза.....	26
1.5 Качество воздушной среды зданий в зонах влияния полигонов ТБО и ПО.....	32
Выводы главе 1.....	37
2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО КАК ИСТОЧНИКОВ БИОГАЗА.....	39
2.1 Уравнения для эмиссии биогаза и газоэнергетического потенциала...	39
2.2 Расчёт количества, площади сечения и дебета газодренажных скважин.	43
2.3 Учёт характеристик полигонов ТБО и ПО как неоднородных объём- ных источников выброса примеси в воздушную среду.....	44
Выводы к главе 2.....	49
3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ БИОГАЗОМ С ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО.....	50
3.1 Натурные исследования температуры биогаза, выбрасываемого с по- лигонов ТБО и ПО.....	50
3.2 Натурные исследования загрязнения биогазом воздушной среды зда- ний ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» и завода «Nissan».....	56
Выводы к главе 3.....	59

4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО.....	61
4.1 Расчёт загрязнения наружного воздуха вблизи полигона ТБО и ПО...	61
4.1.1 Система исходных уравнений.....	61
4.1.2 Граничные условия.....	65
4.1.3 Программная реализация методики расчёта в «Comsol Multiphysics» для прогнозирования загрязнения воздуха вблизи зданий.....	66
4.1.4 Применение методики для определения ПДВ, коэффициентов разбавления компонентов биогаза, размеров СЗЗ полигонов ТБО и ПО.....	71
4.2 Расчёт загрязнения внутреннего воздуха зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО.....	73
4.2.1 Система исходных уравнений.....	73
4.2.2 Граничные условия.....	74
4.2.3 Программная реализация методики в «Comsol Multiphysics» для прогноза загрязнения воздуха зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО.....	75
4.2.4 Методика расчёта загрязнения воздуха биогазом вблизи и внутри зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО.....	79
Выводы к главе 4.....	80
5. СНИЖЕНИЕ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО ПУТЁМ СБОРА, ОЧИСТКИ И УТИЛИЗАЦИИ БИОГАЗА.....	82
5.1 Система сбора, очистки и утилизации биогаза.....	82
5.2 Энергоэкономическая эффективность предложенной системы.....	85
Выводы к главе 5.....	92
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	94
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	96
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	108
ПРИЛОЖЕНИЕ 2.....	111

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 4.....	124
ПРИЛОЖЕНИЕ 5.....	137
ПРИЛОЖЕНИЕ 6.....	139

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования. Во многих странах твёрдые бытовые отходы (ТБО) и промышленные отходы (ПО) подлежат захоронению на полигонах. Например, в РФ для захоронения отходов выделяется более 11000 га земли в год вблизи населённых пунктов без учёта площадей санитарно-защитных зон (СЗЗ) [16]. При разложении отходов выделяется биогаз – ядовитая смесь метана, углекислого газа, аммиака, сероводорода, бензола и других веществ. В условиях интенсивного строительства расположение зданий часто оказывается в зоне влияния полигонов ТБО и ПО. Качество воздуха в местах расположения административных и жилых зданий не соответствует нормативным требованиям. Длительное пребывание людей в таких зданиях приводит к риску возникновения респираторных и онкологических заболеваний, заболеваний системы кровообращения, т.е. возникает «синдром больного здания» [5].

Существующие методики расчёта загрязнения атмосферы биогазом не достаточно подробно учитывают характеристики полигонов ТБО и ПО, как объемных источников выброса вредных веществ, и особенности распространения примесей непосредственно вблизи и внутри зданий, расположенных в зоне их влияния.

Для снижения выброса биогаза в атмосферу рекомендуется его сбор с последующей утилизацией. Однако ряд технических проблем, связанных с качеством очистки биогаза от балласта и вредных примесей, ограничивает его широкое применение на практике в качестве альтернативного источника энергоснабжения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам рассеивания вредных примесей в атмосфере вблизи зданий уделено внимание в работах Гениховича Е.Л., Т.А. Дацюк, И.С. Кузнецова, Н.А. Литвиновой, А.М. Ибрагимова; эмиссии, утилизации биогаза и загрязнения им атмосферы – в работах Г.П. Коминой, Д. Купера, Р. Реинхарта, Ф. Раша, Д. Келли, Г.М. Батраковой, Т.К. Бичелдей,

Т.Б. Гордовской, А.М. Шаимовой, А. Александра, С. Бруклина, О. Табасарана, Г. Реттенбергерга, А. Синглетона, П.П. Кондаурова.

Цель и задачи исследования.

Цель исследования – разработка методики прогноза и снижения негативного влияния полигонов ТБО и ПО на воздушный режим зданий, расположенных в зоне их влияния.

Задачи исследования:

1. Исследования характеристик полигонов ТБО и ПО как источников биогаза – нетрадиционного источника энергии и загрязнителя атмосферы;
2. Аналитический обзор и обобщение существующих методик прогнозирования качества воздушной среды в зоне влияния полигонов;
3. Анализ влияния полигонов ТБО и ПО на воздушный режим зданий, расположенных в зоне их влияния;
4. Натурные исследования загрязнения биогазом воздуха на границе СЗЗ полигонов и в жилой застройке;
5. Разработка методики расчёта загрязнения внутреннего воздуха жилых зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО;
6. Изучение способов утилизации и использования биогаза как альтернативного источника энергии;
7. Совершенствование системы удаления и обезвреживания балласта из биогаза с целью использования его в качестве альтернативного источника энергоснабжения;

Объектом исследования являются полигоны ТБО и ПО и административные и жилые здания, расположенные вблизи них.

Предметом исследования является загрязнение наружной и внутренней воздушной среды зданий, расположенных в зоне влияния ТБО и ПО, использование биогаза как источника альтернативного топлива, выделяющегося при разложении ТБО и ПО.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Получены зависимости для определения эмиссии биогаза, газоэнергетического потенциала, характеристик газодренажных скважин полигонов ТБО и ПО при использовании биогаза как нетрадиционного источника энергии и загрязнения атмосферы.

2. Получены зависимости для расчёта эмиссии компонентов биогаза с участка полигона ТБО и ПО, концентрации и температуры над поверхностью, рассматривая полигоны ТБО и ПО как неоднородные объёмные источники загрязнения атмосферы.

3. Разработана и программно реализована методика расчёта загрязнения биогазом воздуха в застройке, расположенной в зоне влияния полигонов ТБО и ПО, позволяющая установить ПДВ компонентов биогаза, обеспечивая экологически безопасную среду обитания.

4. Разработана и программно реализована методика расчёта загрязнения биогазом воздуха в помещениях зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО.

5. Усовершенствована система сбора, очистки от балласта и утилизации биогаза путём последовательного использования центробежной сепарации, реагентов моноэтаноламина, оксида железа (III) и цеолитов с целью повышения его качества как энергоресурса и снижения его выбросов в атмосферу.

Методологической основой диссертационного исследования является: использование информационно-измерительных, картографических систем, тепловизионная съёмка и математическое моделирование.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.03 – Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение, а именно: п. 1 «Совершенствование, оптимизация и повышение надежности систем теплогазоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, методов их расчета и проектирования. Использование нетрадиционных источников энергии», п. 5 «Тепловой, воздушный и влажностный режимы зданий различного назначения, тепломассообмен в ограждениях и разработка методов расчета энергосбережения в зданиях» и паспорта научной

специальности 03.02.08 – Экология (в строительстве и ЖКХ), а именно 2.3. «Прикладная экология – разработка принципов и практических мер, направленных на охрану живой природы, как на видовом, так и экосистемном уровне; разработка принципов создания искусственных экосистем (строительные системы, урбосистемы, агроэкосистемы, объекты аквакультуры, ЖКХ и т.п.) и управления их функционированием. Исследование влияния антропогенных факторов на экосистемы различных уровней с целью разработки экологически обоснованных норм воздействия строительной, хозяйственной деятельности человека и эксплуатации ЖКХ на живую природу».

Обоснованность и достоверность результатов исследования подтверждена использованием поверенного оборудования, фундаментальных уравнений гидрогазодинамики, теплопроводности, диффузии, сертифицированных программных пакетов, сходимостью результатов расчётов и натурных замеров в контрольных точках, внедрением результатов диссертации.

Практическая ценность и реализация результатов исследований. Получены аналитические зависимости для определения эмиссии биогаза с учётом неоднородности полигона ТБО и ПО, газотергетического потенциала полигона ТБО и ПО, характеристик газодренажных скважин.

Разработана и программно реализована методика расчёта загрязнения наружной и внутренней воздушной среды зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО. Данная методика имеет практическое использование при определении характеристик газодренажных скважин, предельно допустимого выброса (ПДВ) компонентов биогаза, размеров санитарно-защитных зон (СЗЗ) полигонов ТБО и ПО, коэффициентов метеорологического разбавления, эколого-экономический эффект при утилизации биогаза.

Предложена комплексная схема очистки биогаза, повышающая его качество как энергоносителя до уровня, близкого к природному газу.

Результаты диссертации внедрены:

- в проектно-конструкторской деятельности ООО «Тэсла» в 2012 г. при разработке энергопаспортов, программ энергосбережения и повышения энергоэф-

фективности в виде методик расчёта, рекомендаций по утилизации биогаза и оценки санитарно-гигиенических и экологических требований к качеству воздуха;

- при подготовке специалистов (бакалавров) по специальности «Безопасность жизнедеятельности в техносфере», в лекционном курсе дисциплины СД.10 «Системы защиты среды обитания».

Апробация работы. Основные положения работы докладывались: на 64-й Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова «Актуальные проблемы современного строительства» (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ», СПб, 2011); 75-ой Международной научно-технической конференции «Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками» (ОАО «Автоваз», Тольятти, 2011); XXXX Юбилейной Международной научно-практической конференции «Неделя науки СПбГПУ» (ФГБОУ ВПО «СПбГПУ», СПб, 2011); I Всероссийской научно-технической конференции «Современная техника и технологии: проблемы, состояние, перспективы» (РИИ (филиал) ФГБОУ ВПО «АлГТУ», Рубцовск, 2011); Международной конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы строительства и архитектуры» (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ», СПб, 2012); Международном конгрессе «Наука и инновации в современном строительстве-2012», посвящённом 180-летию СПбГАСУ (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ», СПб, 2012).

Научные работы по разработке уравнения эмиссии и очистке биогаза подавались и заняли 2-е место на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ студентов и аспирантов в области технических наук в рамках Всероссийского фестиваля науки в 2011 г.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, общим объемом 7,95 п.л., лично автором – 7,05 п.л., в т.ч. 3 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав с выводами по каждой из них, общих выводов и приложений. Диссертация содер-

жит 141 страницу машинописного текста, 24 таблицы, 31 рисунок, 94 формулы, 6 приложений и список использованной литературы из 102 наименования работ отечественных и зарубежных авторов.

Автор выражает **благодарности** д.т.н., проф. Т.А. Дацюк, Ю.П. Ивлеву, д.т.н., проф. В.Л. Горохову, д.ф.-м.н., проф. Л.А. Толоконникову, за замечания и рекомендации, а также И.М. Бельскому за предоставление необходимого оборудования и помощь при внедрении материалов диссертации.

1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ОЦЕНКИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ВБРОСАМИ БИОГАЗА С ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО

1.1 Существующие методики расчёта загрязнения воздуха биогазом в зонах влияния полигонов ТБО и ПО

Для расчёта качества воздуха в зонах влияния полигонов ТБО и ПО используют рассмотренные ниже методики.

Методика I (Модель Гаусса). Предложена Агентством по Охране окружающей среды США и приведена в виде уравнения [86]:

$$c_{xyz} = \frac{EA}{\sigma_y \sigma_x u} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right); \quad (1.1)$$

где c_{xyz} – концентрация компонента биогаза в точке $(x; y; z)$, мг/м³; E – эмиссия компонента биогаза с единичной площади поверхности полигона, мг·с⁻¹/м³; x, y, z – координаты, м; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – параметры атмосферной дисперсии, м; u – скорость ветра по оси x , м/с; A – площадь поверхности полигона, м².

Впоследствии вместо уравнения (1.2) было предложено уравнение, учитывающее высоту полигонов ТБО и ПО над поверхностью земли [100]:

$$c_{yz} = \frac{E}{2\pi i \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right]; \quad (1.2)$$

где a, b, c, d, f определяются экспериментально; $\sigma_y = ax^b$; $\sigma_z = cx^d + f$; $\pi = 3,14$.

Данная методика применяется в США и некоторых странах Европы. Ограничения применимости модели Гаусса заключаются в том, что она пригодна при скорости ветра до 0,5 м/с и только для точечных и площадных источников, которыми являются лишь небольшие свалки. При сильном ветре она часто даёт ложные результаты, особенно в вертикальном направлении [12,25,88]. Также она не учитывает геометрию полигонов, влияние препятствий на пути воздушного потока, а параметры a, b, c, d, f необходимо уточнять экспериментально.

Методика II (ОНД-86). В РФ и некоторых бывших республиках СССР для

расчётов используется «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86» [1,34], реализованная в программе УПРЗА «Эколог». ОНД-86 позволяет рассчитать максимальные концентрации примеси при умеренно неустойчивом состоянии атмосферы. Ниже приведены основные уравнения ОНД-86 для расчёта поля концентраций примеси в воздухе с предельно малой опасной скоростью ветра (до 0,5 м/с).

Максимальная приземная концентрация примеси в воздухе c_m , мг/м³, для «горячих» выбросов рассчитывается формуле:

$$c_m = AMFm\eta H^{-2/3} \sqrt[3]{9\Delta T}; \quad (1.3)$$

для «холодных» выбросов по формуле:

$$c_m = AMFm\eta/H^{7/3}; \quad (1.4)$$

где A – коэффициент стратификации; M – масса вредного вещества, выбрасываемая в атмосферу в единицу времени, г/с; F – коэффициент оседания, для газообразных веществ и мелкодисперсных аэрозолей $F = 1$; η – коэффициент рельефа местности (для равнины $\eta = 1$); H – высота источника над поверхностью земли, м; m – коэффициент, учитывающий условия выхода газо-воздушной смеси из источника (в нашем случае $m=0,9$); $\mathcal{G}$ – расход газо-воздушной смеси, м³/с; ΔT – разность между температурами выбрасываемой примеси и атмосферного воздуха.

Опасное расстояние от источника x_m , м, с максимальной приземной концентрацией определяется как:

$$x_m = (5 - F)dH/4. \quad (1.5)$$

где d – безразмерный коэффициент, зависит от объёма и скорости выхода газо-воздушной смеси.

При $F = 1$ опасное расстояние x_m определяется как:

$$x_m = 5,7H. \quad (1.6)$$

Концентрации в любой точке расчетной площадки определяются как:

$$c = S_1 c_m; \quad (1.7)$$

S_1 вычисляется по формулам:

$$\begin{cases} S_1 = 3(x/x_m)^4 - 8(x/x_m)^3 + 6(x/x_m)^2; & x/x_m \leq 1 \\ S_1 = 1,13/[0,13(x/x_m)^2 + 1]; & 1 < x/x_m \leq 8 \\ S_1 = x/(3,58x^2/x_m - 35,2x + 120x_m); & x/x_m > 8 \end{cases}; \quad (1.8)$$

где x – расстояние, на котором определяется концентрация, м.

Для низких и наземных источников высотой до 10 м при $x/x_m < 1$ величина S_1 заменяется на величину S_1^H , определяемую как:

$$S_1^H = 0,125(10 - H) + 0,125(H - 2)S_1. \quad (1.9)$$

При использовании ОНД-86 полигон разбивается на группу площадных источников. Данная методика применялась в работах [9,15,60,63,77] и показала удовлетворительные результаты при расчёте полей приземных концентраций компонентов биогаза на полигонах ТБО и ПО РФ.

Полигоны ТБО и ПО являются неоднородными объёмными источниками выброса примеси. Однако методика ОНД-86 позволяет разбить полигон на совокупность неорганизованных площадных источников, в результате чего возникает погрешность расчёта, которая снижается по мере удаления от них. Наиболее точные результаты ОНД-86 даёт на удалении 0,5 км от источника [22,60,63].

Методика III (Уравнение турбулентной диффузии). В работе [7] для расчёта загрязнения атмосферы метаном с полигонов ТБО предлагается численное решение в трёхмерной прямоугольной расчетной области (рисунок 1.1) дифференциального уравнения (ДУ) нестационарной турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = k_{xyz} \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right); \quad (1.10)$$

где c – концентрация, мг/м³; t – фиктивное время, с.; u , v , w – компоненты скорости ветра по осям x , y , z соответственно, м/с; k_{xyz} – кинематическая турбулентная вязкость, м²/с.

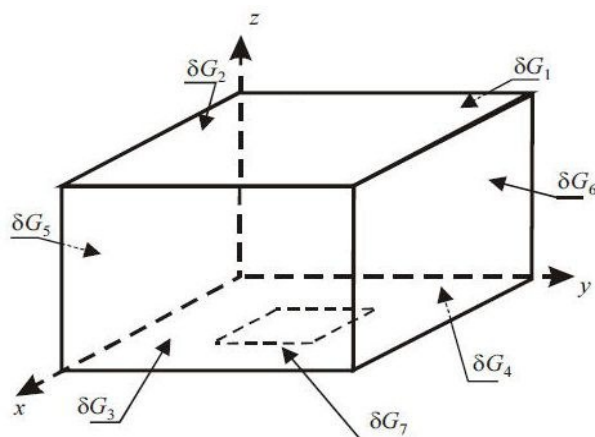


Рисунок 1.1 – Схема расчетной области G и ее границы [7]

Принято допущение, что на боковых гранях δG_1 , δG_3 , δG_5 , δG_6 и верхней грани δG_2 поток переноса примеси установившийся, поэтому производные по соответствующим направлениям равны нулю. На непроницаемой нижней границе – условие отсутствия потока примеси через подстилающую поверхность (кроме грани ∂G_7). Поток метана через границу ∂G_7 находится по уравнению:

$$\Phi = 0,5Q\rho_{CH_4}/(\tau S_{\delta G_7}); \quad (1.11)$$

где Q – годовой валовой выброс биогаза; ρ_{CH_4} – плотность метана; 0,5 – удельное содержания метана в биогазе в общем объёме биогаза; $S_{\delta G_7}$ – площадь грани полигона ТБО δG_7 ; τ – длительность периода эмиссии метана.

Процесс распространения загрязнений в воздухе от низких источников происходит преимущественно в нижней границе приземного слоя атмосферы высотой до 150 м над поверхностью земли [22]. Скорость ветра в области G описывается уравнением Кармана:

$$u = u^* \ln[(z - z_0)/z_0]/\zeta; \quad (1.12)$$

где u^* – динамическая скорость ветра, м/с; z_0 – параметр шероховатости; $\zeta = 0,4$ – константа Кармана.

При наличии шероховатости (например, застройки) предпочтительнее использовать уравнение Кармана в следующем виде [67]:

$$u = u^* \ln[(z - H_{cp} + z_0/C)/z_0]/\zeta; \quad (1.13)$$

где $H_{\text{ср}}$ – средняя высота препятствий, м; C – коэффициент сопротивления. Значения z_0 и C для некоторых поверхностей приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения коэффициентов z_0 и C для некоторых поверхностей [67]

Тип поверхности	z_0 , см	$C \cdot 10^3$
Песок	0,01-0,1	1,2-1,9
Степь	1-4	3,4-5,2
Высокая трава	4-10	5,2-7,6
Пригородная застройка	20-40	10,5-15,4
Центры городов	200-300	61,8-110,4

Граничные условия модели:

$$\left\{ \begin{array}{l} c(t=0; x, y, z) = 0 \\ \frac{\partial c}{\partial x} = 0; x, y, z \in \delta G_1 \cup \delta G_3 \\ \frac{\partial c}{\partial y} = 0; x, y, z \in \delta G_5 \cup \delta G_6 \\ \frac{\partial c}{\partial z} = 0; x, y, z \in \delta G_2 \\ k_{xyz} \frac{\partial c}{\partial z} = \begin{cases} 0; x, y, z \in \delta G_4, x, y, z \notin \delta G_7 \\ \Phi; x, y, z \in \delta G_4, x, y, z \in \delta G_7 \end{cases} \end{array} \right. . \quad (1.14)$$

ДУ (1.1) решается методом конечных разностей (МКР). С практической точки зрения целесообразна стационарная постановка задачи. Она значительно уменьшает число итераций, а тем самым и время расчётов. Для получения стационарного решения используется метод установления, согласно которому задача решается с большим шагом по времени [90,94].

Главное достоинство этой методики заключается в том, что она базируется на фундаментальном ДУ турбулентной диффузии. Однако следует отметить имеющиеся недостатки:

1. В реальности полигоны ТБО и ПО являются не площадными, а неоднородными объёмными источниками выброса примеси.
2. Не учитывается влияние различных элементов шероховатости (застройки).

3. Турбулентная вязкость не рассчитывается, а принимается как константа.

4. Использование метода МКР для расчета загрязнения воздуха в условиях реальной геометрии не является эффективным [44,54].

Анализ рассмотренных методик показал, что не учитывается покрытие полигонов защитным слоем грунта толщиной h , обычно равной 0,2 м [68], которое оказывает сопротивление эмиссионному потоку, а также газодренажные системы.

Рассмотренные методики позволяют оценить качество воздуха вблизи зданий, но не предназначены для определения загрязнения воздуха внутри зданий.

1.2 Методики расчёта эмиссии биогаза с полигонов ТБО и ПО

Для оценки газознергетического потенциала и расчёта загрязнённости атмосферы биогазом необходимо знать количество, в котором он выделяется. Ниже приведён аналитический обзор основных методик расчёта эмиссии биогаза.

Методика I (Табасарана-Реттенбергера) [81] используется в США и некоторых странах Европы для предварительной оценки удельного выхода биогаза G_g , м³/т, при разложении 1 т отходов однородного состава:

$$G_e = 1,868C(0,014T_{отх} + 0,28)(1 - 10^{-kt}); \quad (1.15)$$

где $C = 150-220$ кг/т – общее содержание органического углерода, кг/т отходов; $T_{отх}$ – температура отходов, °C; $k = 0,035-0,045$ год⁻¹ – константа разложения; t – время с момента захоронения, лет.

Исследования [81] показали, что она даёт заниженные результаты.

Методика II (EPA). Разработана Агентством по Охране окружающей среды США и реализована в программном пакете «LandGEM 3.02» [83]. Годовой выход метана Q_{CH_4} , м³/год, рассчитывается по дискретному аналогу уравнения распада 1-го порядка:

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 kL_0(M_i / 10)e^{-kt_{ij}}; \quad (1.16)$$

где i – порядковый номер года; n – общее количество лет (разность расчетного и начального года); j – номер шага по времени (время эксплуатации полигона в пределах каждого года заменяется дискретным аналогом с шагом 0,1 года); L_0 – объём образующегося метана при полном разложении 1 т отходов:

$$L_0 = K_1 K_2 K_3 F_{CH_4}; \quad (1.17)$$

где K_1 – объём биогаза, образующегося при анаэробном разложении 1 т углерода, м³/т; K_2 – доля органического углерода в составе отходов до начала их разложения; K_3 – доля органического углерода, разлагающегося анаэробно; $F_{CH_4} = 0,4-0,6$ – объёмная доля метана в составе образующегося биогаза; k – скорость разложения отходов: для влажной среды $k = 0,7$ год⁻¹; для нейтральной $k = 0,04-0,05$ год⁻¹; для сухой $k = 0,02$ год⁻¹.

Данная методика даёт результаты расчётов наиболее близкие к экспериментальным и хорошо зарекомендовала себя для расчёта эмиссии биогаза на полигонах ТБО и ПО Европы [93]. Она также получила хорошие результаты при расчёте эмиссии метана на отечественных полигонах ТБО Пермского края [6].

Методика III (Вебер, 1990) [101] позволяет определить удельное количество биогаза на 1 т отходов G_t , образовавшееся за время t , лет:

$$G_t = 1,868 C_T f_{ao} f_o f_a (1 - 10^{-kt}); \quad (1.18)$$

где C_T – общий органический углерод, кг/т отходов; f_{ao} – коэффициент биогазовой продуктивности в первые полгода после захоронения отходов; f_o – отношение преобразовавшегося в биогаз углерода в реальных свалочных условиях к оптимальным; f_a – отношение превратившегося в газ углерода при оптимальных условиях к общему углероду; k – коэффициент разложения отходов, год⁻¹.

Методика IV («Scholl Canyon») [92]. Годовое образование метана Q , м³/год, определяется как:

$$Q = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt}); \quad (1.19)$$

где L_0 – потенциал метаногенеза отходов, м³/т; R – среднегодовое количество захороненных отходов, т/год; k – константа метаногенеза, год⁻¹; c и t – соответ-

ственно время с момента закрытия и открытия полигона, лет.

Методика V («EMCON») [98]. Максимальный объём метана C_i при разложении сырой массы компонента отходов i описывается уравнением:

$$C_i = k k' W_t P_i (1 - M_i) V_i E_i; \quad (1.20)$$

где k – коэффициент, учитывающий эмиссию метана при разложении органического углерода, л/кг; k' – эмпирический коэффициент, учитывающий состав вещества; W_t – общая масса влажных отходов; P_i – фракция компонента i от общей массы отходов по сырому весу; M_i – фракционное содержание влажности компонента i по массе; V_i – изменчивость фракции состава отходов компонента i по сухому весу; E_i – доля сухого вещества разлагающегося компонента i .

Методика VI (АКХ им. К.Д. Памфилова). Используется для расчёта эмиссии биогаза на полигонах ТБО и ПО РФ. Удельная масса биогаза Q_w , кг/кг, при метановом брожении 1 кг влажных отходов за период активной стабилизированной генерации определяется как [33]:

$$Q_w = 10^{-6} R (100 - \varphi) (0,92 \mathcal{K} + 0,62 Y + 0,34); \quad (1.21)$$

где R – содержание органической составляющей в отходах, %; φ – влажность отходов, %; $\mathcal{K}$ – содержание жироподобных веществ, %; Y – содержание углеводоподобных веществ, %; B – содержание белковых веществ, %.

Период полного сбраживания быстро разлагающейся органической части отходов T , лет, определяется по уравнению [33]:

$$T = 10248 \cdot (t_{\text{ср.тёпл}})^{-0,301966} / T_{\text{тёпл}}; \quad (1.22)$$

где $T_{\text{тёпл}}$ – тёплый период года, дней, в пределах которого температура воздуха выше 0°C ; $t_{\text{ср.тёпл}}$ – средняя из среднемесячных температура воздуха в районе полигона за тёплый период года, $^\circ\text{C}$.

Удельный выход биогаза, Q_t , $\text{м}^3/\text{т}$, определяется как [37]:

$$Q_t = 1,85 \cdot 10^4 G_0 (1 - 10^{-kt}) / (59 - W)^4; \quad (1.23)$$

где G_0 – удельная эмиссия биогаза, $\text{м}^3/\text{т}$ отходов; t – время с момента открытия

полигона ТБО и ПО, лет; W – естественная влажность отходов, %.

Методика VII. Для действующих полигонов ТБО и ПО скорость образования метана V , м³/год, определяется как [27]:

$$V = (1 - \varphi)L_0 M k_1 k_2 \tau (e^{-k_1 \tau} - e^{-k_2 \tau}) / (k_2 - k_1); \quad (1.24)$$

где φ – влажность отходов; L_0 – потенциал генерации метана, м³/т, при разложении органической составляющей сухих отходов; M – масса отходов на текущий год эксплуатации полигона; k_1, k_2 – константы разложения отходов в фазах ацетогенеза и метаногенеза соответственно, год⁻¹; τ – время разложения отходов, лет.

Методика VIII (Используется в Украине). Количество биогаза $V_{p.б}$, м³, при анаэробном разложении 1 т ТБО рассчитывается как [45]:

$$V_{p.б} = P_{ТБО} K_{л.о} (1 - Z) K_p; \quad (1.25)$$

где $P_{ТБО}$ – общая масса отходов на полигоне, кг; $K_{л.о} = 0,5-0,7$ – содержание легко-разлагаемой органики в 1 т отходов; $Z = 0,2-0,3$ – зольность органического веществ; $K_p = 0,4-0,5$ – максимально возможная степень анаэробного разложения органического вещества за расчетный период.

Главный недостаток этой методики заключается в том, что она не учитывает протекание анаэробных процессов и время разложения отходов.

Методика IX (А.М. Шаимова, 2008) [79-81]. При разложении отходов количество образующегося биогаза Q в % объёма находится по уравнению:

$$Q = 0,04T + 0,05\varphi + 0,0004T\varphi - 2,74; \quad (1.26)$$

где T – температура в толще отходов, °С; φ – влажность отходов, %.

Объём биогаза Q , м³/с, для полигона заданной вместимости площадью A , м², и глубиной залегания отходов $H_{глуб}$, м, можно определить как [79]:

$$Q = 1000 q_{уд} A H_{глуб}; \quad (1.27)$$

где $q_{уд}$ – константа удельного выхода биогаза, м/с.

Данная методика не учитывает состав, время разложения отходов и т.д. Большим её преимуществом является то, что она учитывает неоднородность эмиссии биогаза по площади и высоте полигона ТБО и ПО.

Из всех методик только II и VI учитывают влияние захоронения новых отходов на действующих полигонах. Достоинство методики II заключается и в том, что в её основу положено фундаментальное уравнение распада 1-го порядка, поэтому построение модели эмиссии биогаза будет основано на ней. Учёт химического состава отходов и температуры воздуха будет основан на методике VI, неоднородности эмиссии биогаза по высоте и площади полигона – на методике IX.

Рассмотренные выше методики позволяют определить общее количество выбрасываемого биогаза без учета особенностей их выделения.

Если полигоны оснащены газодренажными скважинами, то выход биогаза происходит через горизонтально проложенные перфорированные трубы, соединённые со скважинами. Пример таких скважин приведён на рисунке 1.2.



Рисунок 1.2 – Газодренажные скважины полигона ПО «Приморская свалка» г. Санкт-Петербурга

Поверхность полигона изолируется слоем глины или геосинтетической мембраной. В этом случае полигон можно рассматривать как совокупность точечных источников выброса.

Скважины подбираются так, чтобы их пропускная способность была одинаковой. Давление внутри скважин незначительно выше атмосферного [32,76]. Площадь сечения одной скважины $S_{\text{скв}}$, м², находится как [68]:

$$S_{\text{скв}} = Q / (n_{\text{скв}} g_{\text{биогаза}}); \quad (1.28)$$

где Q – объём выбрасываемого биогаза, $\text{м}^3/\text{с}$; $g_{\text{биогаз}}$ – скорость движения биогаза в скважинах, $\text{м}/\text{с}$, не более $0,1 \text{ м}/\text{с}$; $n_{\text{скв}}$ – расчётное число скважин.

Использование уравнения (1.28) может вызвать на практике затруднение, т.к. объём выбрасываемого биогаза зависит не только от количества и условий разложения отходов, но и от его давления и температуры.

1.3 Обзор результатов натурных обследований состояния воздушной среды в местах расположения полигонов

1. Исследования на полигонах ПТО-1 «Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки» г. Санкт-Петербурга.

Полигон ПТО-1 «Волхонский» расположен в Московском районе Санкт-Петербурга. Его эксплуатация была начата в 1978 г. Площадь для складирования отходов составляла 25 га, высота складирования – 26 м. План полигона с результатами газокерновой съёмки [77] приведён на рисунке 1.3.

На рисунке 1.3 видно, что на полигоне имелись зоны с аномально высоким выделением метана. Однако приведённые в той же работе результаты газогеохимической съёмки в нижней аномальной зоне на глубине $0,7 \text{ м}$ от поверхности полигона на уровне почвенного горизонта и на границе раздела «земля-воздух» показали, что по мере приближения к поверхности полигона содержание биогаза в его теле за счёт диффузии начинает распределяться практически равномерно по её площади. Тогда влияние этих зон можно не учитывать.

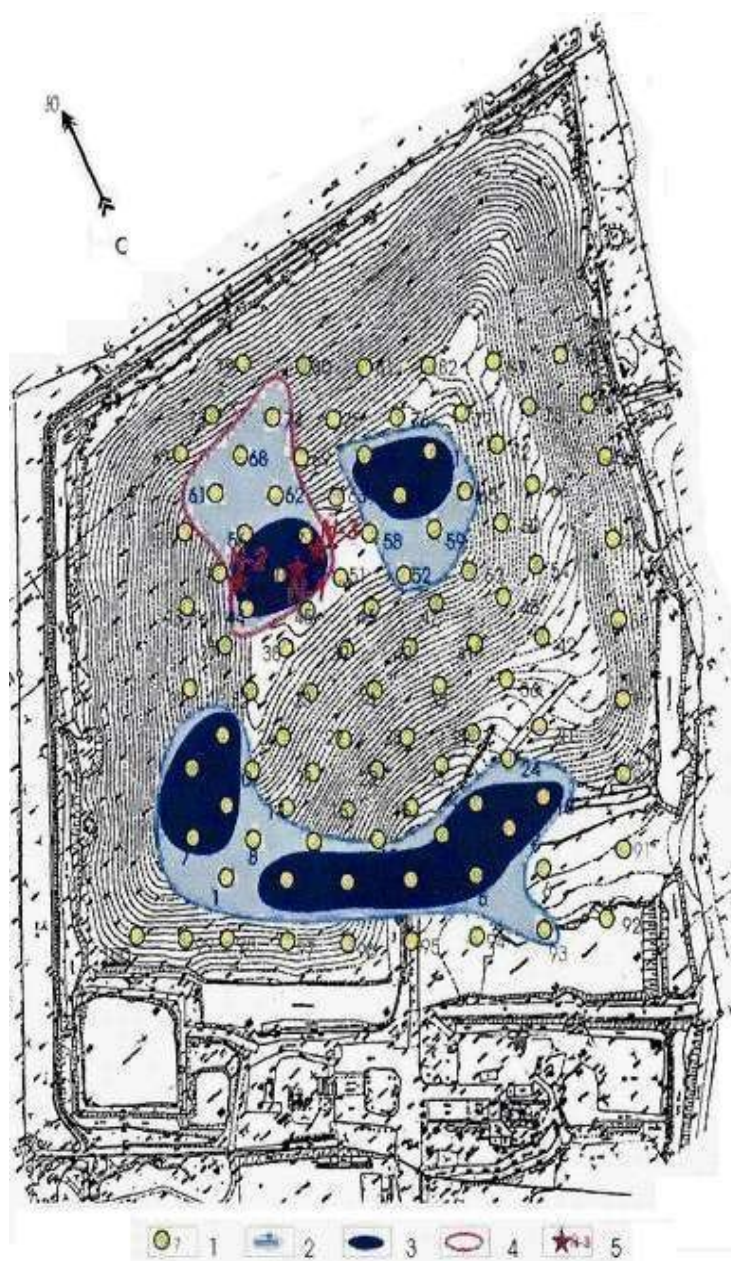


Рисунок 1.3 – План полигона ПТО-1 «Волхонский» с результатами газокерновой съёмки [77]: 1 – точки отбора проб и их номера; содержание метана в почвенном воздухе: 2 – 5-10%, 3 – более 10%; 4 – участок работ для установки скважин; 5 – установленные скважины и их номера

Замеры концентраций метана и углекислого газа в воздухе проводились 31.08.01 на высоте 1,5-1,8 м над верхней площадкой полигона с помощью газоанализаторов при скорости ветра 4 м/с, направлении ветра 30° (северо-северо-восточный), температуре воздуха 15,4°C, относительной влажности 65%, атмосферном давлении 100,82 кПа [77]. Концентрация метана составила 13-39,93 мг/м³, углекислого газа – 665,1-819,9 мг/м³.

При повторном эксперименте 24.09.01 при температуре воздуха +6,4°C,

скорости ветра 4 м/с, направлении ветра 5° (северо-северо-восточный), относительной влажности воздуха 83%, атмосферном давлении 101,03 кПа замерялись также концентрации бензола, ксилола (смеси изомеров) и др. [77]. Концентрация метана составила 11,59-38,43 мг/м³, углекислого газа – 680,4-837,9 мг/м³, ксилола (смесь изомеров) – 0,002-0,07 мг/м³, бензола – 0,003-0,041 мг/м³.

Полигон ПТО-3 «Новосёлки» (рисунок 1.4) введён в эксплуатацию в 1972 г., его площадь отвала отходов составляет 65,75 га, высота – 10-30 м.



Рисунок 1.4 – Полигон ПТО-3 «Новосёлки» (получено с помощью «Wikimapia»)

Суточные замеры эмиссии компонентов биогаза приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Суточные суммарные эмиссии биогаза на полигоне ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01 [77]

Эмиссия	Компонент биогаза			
	Метан	Углекислый газ	Бензол	Ксилолы (смесь изомеров)
кг/сут.	27700	94300	7,9	3,3
м ³ /сут.	43210	51200	-	-
г/(м ² ·сут.)	115	393	0,03	0,14

Замеры эмиссий и концентраций в воздухе метана и углекислого газа над верхней площадкой полигона проводились 26.08.01 на высоте 1,5-1,8 м при ско-

рости ветра 2 м/с, направлении ветра 40° (северо-восточном), температуре воздуха 9°C, атмосферном давлении 100,45 кПа, относительной влажности воздуха 54%. Концентрация метана составила 8,65-19,3 мг/м³, углекислого газа – 690,3-738 мг/м³. Суточные суммарные (со всего полигона) эмиссии компонентов биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки» приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Суточные суммарные эмиссии компонентов биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01 [77]

Компонент	Эмиссия компонента биогаза		
	кг/сут.	м ³ /сут.	г/(м ² ·сут.)
Метан (старая площадка)	2050	3200	31
Метан (новая площадка)	3680	5750	17
Углекислый газ (старая площадка)	10500	5720	136
Углекислый газ (новая площадка)	16300	8810	88

Для Санкт-Петербурга $T_{\text{тёпл}} = 226$ дней, $t_{\text{ср.тёпл}} = 11,07^\circ\text{C}$ [73]. Средние фоновые концентрации загрязняющих веществ в 2001 г., содержащиеся в биогазе, по данным [23,26,42]; метана – 0,125 мг/м³, углекислого газа – 682,956 мг/м³, бензола – 0,001 мг/м³, ксилола (смеси изомеров) – 0,0074 мг/м³.

2. Исследования на полигоне «Центральный» Волгограда.

Полигон ТБО и ПО «Центральный» Дзержинского района Волгограда начал свою работу в 1949 г. По состоянию на 2007 г. полигон имел площадь 51179 м², площадь его верхней площадки около 22500 м², высота над поверхностью земли 39 м, захоронено около 250 тыс. т отходов. На границе его СЗЗ расположен пос. Овражный (рисунок 1.5, верхняя площадка полигона обведена линией). В таблице 1.4 приведены замеры среднегодовых приземных концентраций наиболее типичных опасных компонентов биогаза, замеренных на территории АХЗ на расстоянии 10 м от полигона, 50 м от посёлка Овражный и в его центре в 2006-2007 г.г.



Рисунок 1.5 – Полигон «Центральный», М 1:100 (получено с помощью «Яндекс. Карты»)

Таблица 1.4 – Значения среднегодовых концентраций компонентов биогаза в районе полигона «Центральный» [11]

Вещество, контрольная точка, год	Концентрация*, мг/м ³
Метан, здания АХЗ в 10 м от полигона, 2007	57,8-86,6
Метан, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный, 2007	17,0-25,4
Метан, центр пос. Овражный, 2007	18,0-27,0
Сероводород, здания АХЗ в 10 м от полигона, 2006	0,003-0,005
Сероводород, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный, 2006	0,003-0,005
Сероводород, центр пос. Овражный, 2006	0,0049-0,0081
Аммиак, здания АХЗ в 10 м от полигона, 2006	0,11-0,19
Аммиак, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный, 2006	0,11-0,19
Аммиак, центр пос. Овражный, 2006	0,13-0,23

* Диапазон концентраций приведён от минимальной до максимальной

Фоновые концентрации веществ, содержащихся в биогазе, составляют: в 2007 г. метана – 0,125 мг/м³, в 2006 г. сероводорода – 0,002 мг/м³, в 2006 г. аммиака – 0,0025 мг/м³ [26,42]. На территории расположения полигона преобладает северо-западное направление ветра со среднегодовой скоростью 6,3 м/с, относительная влажность воздуха в тёплый период года 53-57%, атмосферное давление 996,8-1005,2 кПа [41]. Для Волгограда $T_{\text{тёпл}} = 248$ дней, $t_{\text{ср.тёпл}} = 16,81^{\circ}\text{C}$ [73].

Одна из эффективных мер по снижению загрязнения воздуха в зонах влияния полигонов – утилизация биогаза.

1.4 Утилизация биогаза

На полигоне, оснащённом системой утилизации биогаза, выполняется его сбор и очистка с последующим энергетическим использованием. Утилизация биогаза оказывает большой эколого-экономический эффект, т.к. метан, чрезвычайно устойчивый к распаду в атмосфере [4], сжигается, и одним из конечных продуктов сгорания является углекислый газ, потенциал глобального потепления в 21 раз ниже, чем у метана [85]. Сбор биогаза также позволяет не допустить выброс в атмосферу его таких опасных компонентов, как аммиак, сероводород, галогеносодержащие углеводороды.

Принципиальная схема сбора биогаза изложена в работах ОАО «АКХ им. Памфилова». Полигон разделяется на очереди с периодом эксплуатации 3-5 лет, каждая из них делится на рабочие карты высотой 2 м и площадью 8-10 тыс.м². Очередь эксплуатации полигона разбивается по высоте на зоны толщиной 8-10 м. На основании рабочей карты на полигоне строятся скважины (рисунок 1.6), к которым через каждые 2 м по высоте подводятся 3-4 дренажных сети длиной 10-15 м каждая (рисунок 1.7). Дренажная сеть состоит из перфорированных асбестоцементных труб Ø50-60 и щебня фракции 30-60 мм. На устье скважины монтируется трубная головка, являющаяся её опорой и обеспечивающая герметизацию обсадной трубы. Через дрены биогаз направляется в газосборную сеть. На первой очереди, покрытой изолирующим слоем, монтируются устья скважин, запорная арматура, промежуточные, затем магистральные газопроводы.

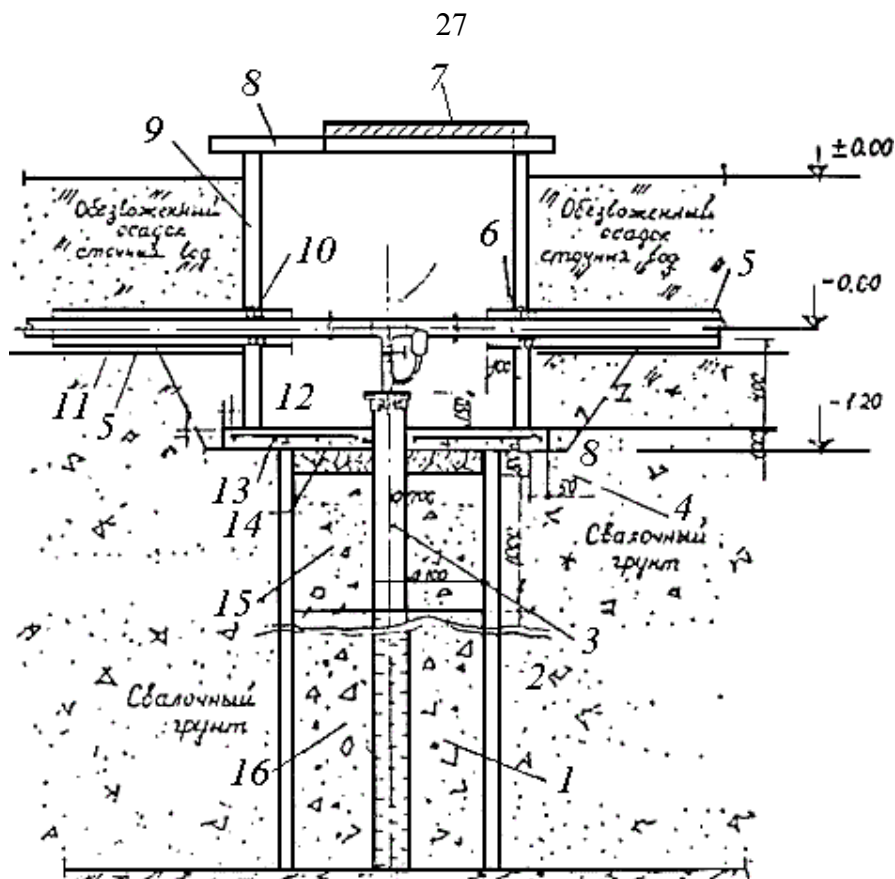


Рисунок 1.6 – Схема устройства газодренажной скважины для действующих полигонов [76]: 1 – асбестоцементные трубы с перфорацией $d = 100$ мм; 2 – железобетонное кольцо К-7-10; 3 – асбестоцементная труба без перфорации $d = 100$ мм; 4 – сетка С-1; 5 – стальной футляр $d = 200$ мм, $l = 1000$ мм; 6 – просмоленная прядь; 7 – люк чугунный $d = 0,7$ мм; 8 – сборная железобетонная плита КП-12; 9 – железобетонное кольцо К-10-10; 10 – бетон марки М-200; 11 – газопровод $d = 100$ мм; 12 – цементная стяжка; 13 – монолитный железобетон марки М-200; 14 – мятая глина; 15 – бетон М-200; 15 – щебень фракций 15-30 мм.

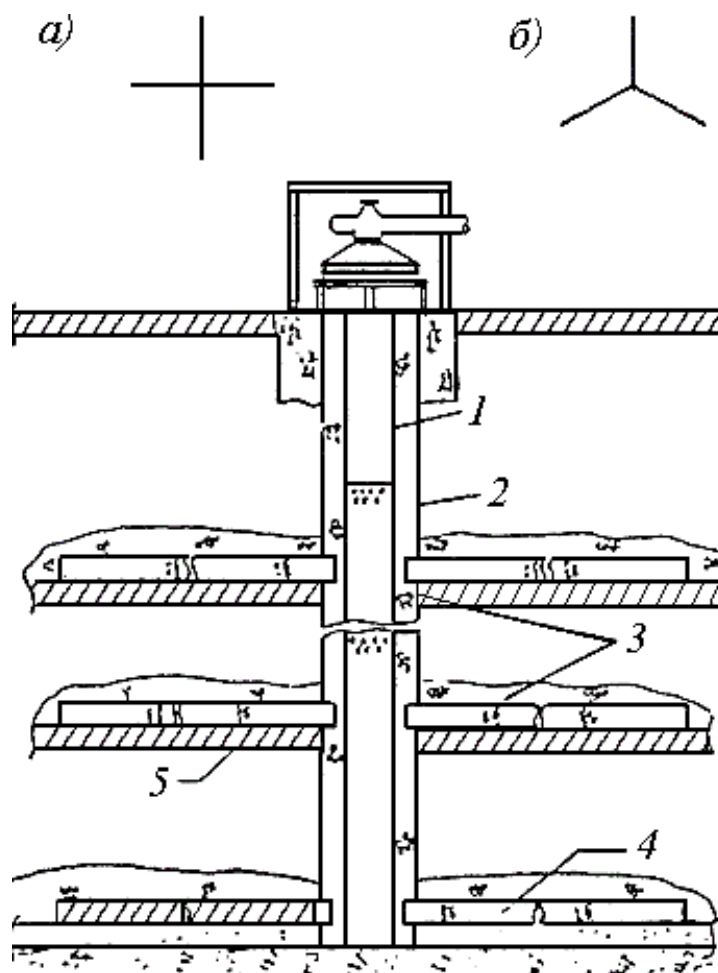


Рисунок 1.7 – Схема устройства дренажных сетей полигона [76]: *а* – дренажная сеть из четырёх отводов; *б* – дренажная сеть из трёх отводов; *1* – обсадная труба без перфорации; *2* – железобетонное кольцо $d = 1$ м; *3* – крупнозернистый щебень; *4* – перфорированная дренажная труба; *5* – слой изоляции

Для сбора биогаза с закрытых полигонов пробуриваются скважины $\varnothing 150$ на всю глубину слоя захоронения отходов. Пространство между скважиной и обсадной трубой засыпается крупнозернистым щебнем и заливается бетоном на глубину 0,5 м (рисунок 1.8). Площадь вокруг скважины на расстоянии 1,5-2 м изолируется слоем бетона или глины толщиной 30-40 см.

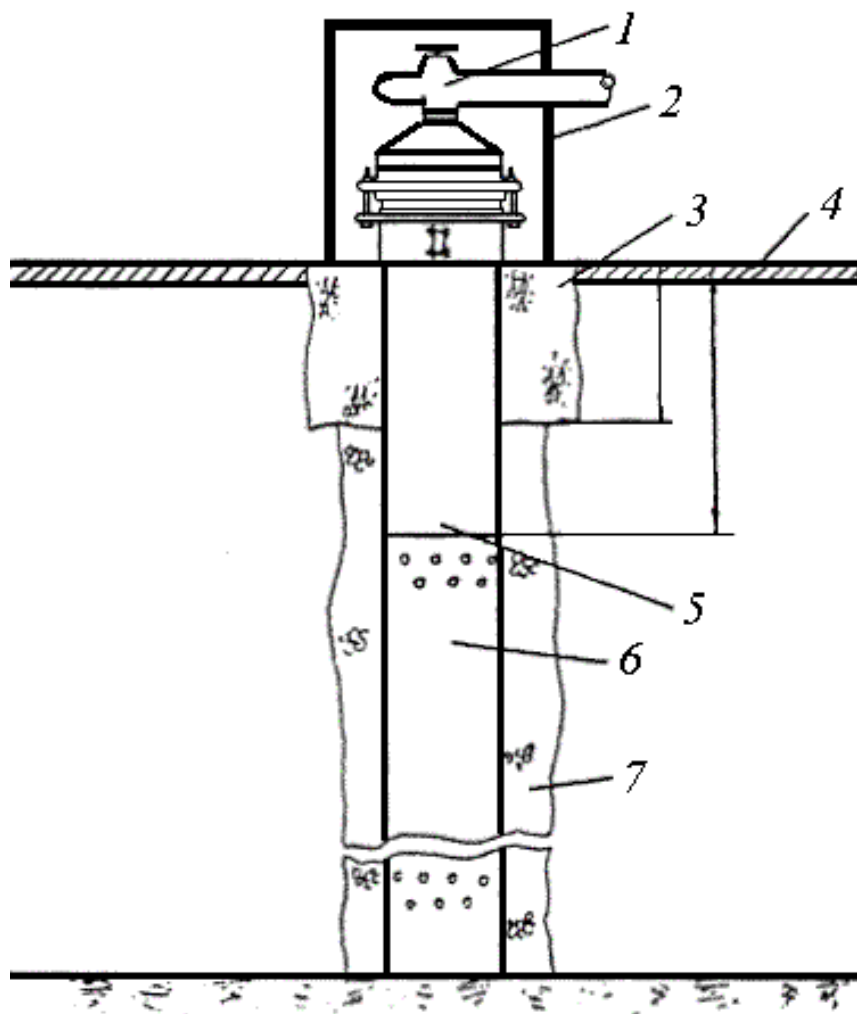


Рисунок 1.8 – Конструкция газодренажной скважины для закрытых полигонов [76]: 1 – оголовок скважины; 2 – колодез; 3 – бетон; 4 – изоляционный слой; 5 – обсадная труба без перфорации; 6 – перфорированная обсадная труба; 7 – щебень

Скважины располагаются в виде квадратной сетки с расстоянием друг от друга не менее 30 м и соединяются между собой промежуточными газопроводами, подключёнными к магистральному, по которому биогаз поступает на очистку.

Наиболее типичная схема подготовки для биогаза, приведена на рисунке 1.9. В настоящее время эта схема используется как в РФ, так и за границей (в США, Китае, Индии странах Европы и т.д.) [99].

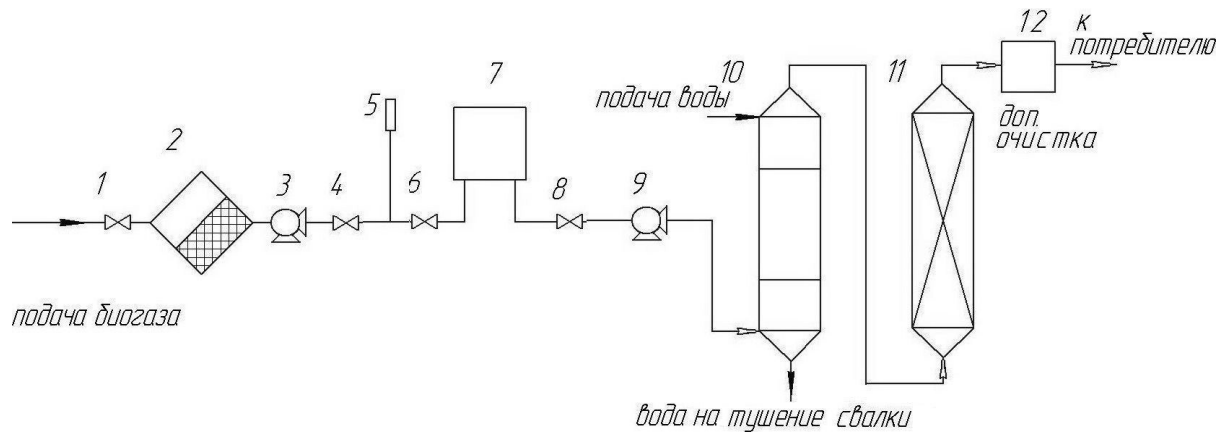


Рисунок 1.9 – Схема газоподготовки при использовании биогаза [80]: 1, 4, 6, 8 – запорная арматура; 2 – коллектор; 3, 9 – компрессоры; 5 – пламегаситель; 7 – газгольдер; 10 – абсорбер; 11 – адсорбер; 12 – оборудование для дополнительной очистки

Очистка биогаза от сероводорода осуществляется с помощью оксида железа (III). При этом выделяется теплота осушающая биогаз. Углекислый газ отделяется от метана с помощью воды и мембранных технологий. Галогенсодержащие углеводороды адсорбируются с помощью активированного угля.

Очистку газа от сероводорода и углекислого газа можно произвести также с помощью водного раствора моноэтаноламина ($\text{HO}-\text{CH}_2\text{CH}_2-\text{NH}_2$). Схема установки очистки газа с регенерацией моноэтаноламина приведена на рисунке 1.10.

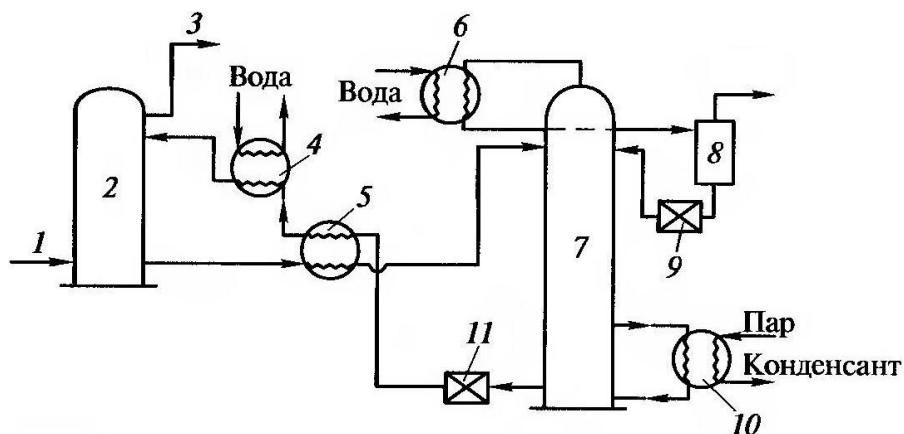


Рисунок 1.10 – Схема очистки газа от сероводорода и углекислого газа с регенерацией моноэтаноламина [10]: 1, 3 – газопроводы; 2 – абсорбер; 4, 6 – холодильники; 5 – теплообменник; 7 – выпарная колонна; 8 – сепаратор; 9, 11 – насосы; 10 – кипятильник

Неочищенный газ по газопроводу 1 поступает в абсорбер 2 и выходит в га-

зопровод 3. В абсорбер подается регенерированный раствор этаноламинов, поглощающий сероводород и углекислый газ. Продукты химической реакции через теплообменник 5 и поступают в выпарную колонну 7, где происходит их подогрев. Дополнительный подогрев проводится также в кипятильнике 10. В выпарной колонне 7 при температуре около 100°C происходит регенерация моноэтаноламина. В холодильнике 6 пары охлаждаются и в сепараторе 8 разделяются на газы и конденсат. Конденсат отсасывается насосом 9 и подается в выпарную колонну 7, а газы идут на дальнейшую переработку или обезвреживаются (сжигаются). Регенерированный раствор моноэтаноламина из выпарной колонны 7 подается насосом 11 в абсорбер 2. При этом раствор охлаждается в теплообменнике 5 и холодильнике 4. Основные достоинства этого способа заключаются в достаточно высокой степени очистки (до 99%), регенерируемости, незначительных потерях реагента, компактности установки, автоматизация процесса. Углекислый газ допускается выбрасывать в атмосферу, а сероводород требуется обезвредить.

В настоящее время для очистки от галогенсодержащих углеводородов, аммиака, сероводорода, углекислого газа предложено также использовать цеолиты [30], которые в отличие от активированного угля способны поглощать аммиак. Однако из-за высокого содержания балласта в биогазе цеолитовый фильтр будет быстро засоряться, а фильтрующий материал необходимо заменять, т.к. регенерация цеолитов возвращает к проблеме обращения с балластом биогаза.

Собранный и очищенный биогаз обладает объёмной теплотой сгорания около 23-31 МДж/м³ или 60-80% от теплоты сгорания природного газа.

Важной характеристикой, определяющей взаимозаменяемость при сжигании газообразных топлив и постоянство теплового потока, является число Воббе $W_{OB,OH}$ (индекс «OB» означает – высшее, «OH» – низшее):

$$W_{OB,OH} = Q_{OB,OH}^P \sqrt{\rho_{\text{возд}} / \rho_{\text{газа}}}; \quad (1.29)$$

где $\rho_{\text{возд}}$ и $\rho_{\text{газа}}$ – плотности воздуха и газа в стандартных условиях, кг/м³; $Q_{OB,OH}^P$ – объёмная теплота сгорания газа (высшая, низшая), МДж/м³.

Сравнение характеристик биогаза в зависимости от его очистки и природно-

го газа приведено в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Сравнение характеристик биогаза при различных степенях его очистки и природного газа [10,99,102]

Характеристика		Неочищенный биогаз	Очищенный биогаз с максимальным содержанием метана	Природный газ
Содержание вещества в составе смеси, % объёма	Метан	35,0-70,0	99,0	37,0-99,0
	Гомологи метана	-	-	0,015-45,6
	Углекислый газ	40,0-47,0	<1,0	0,01-4,0
	Прочие примеси	15,0	<1,0	1,0-11,8
Высшее число Воббе, МДж/м ³		18,0-27,0	47,9	39,4-55,0

Анализ данных в таблице 1.5 показывает, что при существующей технологии очистки биогаза его использовать вместо природного газа, подобрав горелку с соответствующим числом Воббе.

Недостатки существующей схемы очистки следующие:

- в биогазе содержатся частицы пыли, засоряющие контейнеры, в результате чего ухудшается качество его очистки, а реагент периодически нужно обновлять;
- влагосодержание биогаза достигает 5-7% по объёму [21], и для его осушки теплоты экзотермической реакции сероводорода с оксидом железа III) может быть недостаточно.

1.5 Качество воздушной среды зданий в зонах влияния полигонов ТБО и ПО

Биогаз, выделяющийся при разложении ТБО и ПО на полигонах, при отсутствии систем его утилизации или сжигания выбрасывается в атмосферу. вследствие чего загрязняется атмосферный воздух. Качество воздушной среды вблизи полигонов зависит от стратификации атмосферы, геометрических размеров полигона, характера подстилающей поверхности, наличия застройки. Размеры полигонов, как правило, на несколько порядков превышают размеры зданий. Профиль

ветра при обтекании полигона претерпевает деформацию. На подветренной стороне полигона образуются циркуляционные течения, которые способствуют накоплению вредных веществ у наветренного края полигона.

С целью предупреждения негативного влияния на воздушную среду зданий СанПиН [55,70] устанавливает ограничения на строительство зданий вблизи полигонов. Размеры СЗЗ полигонов ТБО обычно составляют не менее 500 м. Границы СЗЗ устанавливаются по изолинии предельно-допустимой концентрации (ПДК) или ориентировочно безопасного уровня (ОБУВ) компонентов биогаза. Значения ПДК и ОБУВ принимаются по гигиеническим нормам [18,19]. Размеры СЗЗ полигонов ПО до населённых пунктов, культурно-оздоровительных объектов, устанавливаются с учётом конкретных местных условий, но не менее 3 км [69]. Размеры СЗЗ L промышленных объектов с максимальными концентрациями загрязняющих примесей уточняются с учетом розы ветров [43,52]:

$$L = L_0 P / P_0; \quad (1.30)$$

где L_0 – расчетный размер участка в данном направлении, где концентрация примеси превышает ПДК (ОБУВ); P_0 – показатель повторяемости направления ветра при круговой розе ветров, % (для 8-руμβовой розы ветров $P_0 = 100\% / 8 = 12,5\%$).

За границей требования к размерам СЗЗ полигонов ТБО схожие (кроме Франции, где размер СЗЗ начинается от 200 м) [46].

Для того чтобы концентрация на границе СЗЗ l -го компонента (биогаза) c_l , мг/м³, не превышала ПДК _{l} , определяется величина его предельно-допустимого выброса ПДВ _{l} , мг/с.:

$$\text{ПДВ}_l = K_p (\text{ПДК}_l - c_{l\phi}); \quad (1.31)$$

где $K_p = m_l / c_l$ – коэффициент метеорологического разбавления, м³/с, где m_l – эмиссия l -го компонента, мг/с.; $c_{l\phi}$ – фоновая концентрация l -го компонента, мг/м³.

Однако границы СЗЗ, которые устанавливаются согласно [18,19], не обеспечивают нормативных требований к качеству воздуха в зонах административной и

жилой застройки вблизи полигонов ТБО и ПО. Нередко торговые и жилые комплексы располагаются в непосредственной близости от полигона ПО, например, «Приморская свалка» Санкт-Петербурга и полигона ТБО «Некрасовка» Москвы (рисунки 1.11 и 1.12).



Рисунок 1.11 – Полигон ПО «Приморская свалка» Санкт-Петербурга (получено в «Google Earth»)



Рисунок 1.12 – Полигон ТБО «Некрасовка» Москвы (получено в «Google Earth»)

На юго-востоке от полигона ПТО-3 «Новосёлки», расположенного в Выборгском районе Санкт-Петербурга, на расстоянии 500 м расположен завод «Nissan», на расстоянии 5,06 км расположен жилой комплекс (ЖК) «Дом на Нижне-Каменной улице» по адресу: 197373, г. Санкт-Петербург, Нижне-Каменная ул., участок 2 (рисунок 1.13).



Рисунок 1.13 – Расстояния от полигона ПТО-3 «Новосёлки» до завода «Nissan» и ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» (получено с помощью «Яндекс. Карты»)

На территории завода и ЖК периодически ощущается неприятный запах, вызванный выбросом аммиака и бензола полигоном ПТО-3 «Новосёлки» в воздушную среду. Анализируя рисунок 1.13, можно прийти к выводу, что наиболее «опасным» направлением ветра с точки зрения загрязнения биогазом воздуха вблизи ЖК является северо-западное.

Жилые здания, как правило, имеют естественную вентиляцию. Вредные вещества с приточным воздухом и вследствие воздухопроницаемости через неплотности ограждающих конструкций (ОК) поступает в помещения, что приводит к возникновению неблагоприятных для здоровья людей условий.

Даже в случае, когда приточные устройства (клапаны, форточки) системы естественной вентиляции закрыты, внутрь помещений поступают вредные вещества за счёт воздухопроницаемости ОК вследствие разности давления наружного и внутреннего воздуха. Разность давления Δp , Па, определяется как [72]:

$$\Delta p = 0,55gH_{\text{зд}}(\rho_{\text{н}} - \rho_{\text{в}}) + 0,03g\rho_{\text{н}}V^2; \quad (1.32)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; $H_{\text{зд}}$ – высота здания от уровня

пола 1-го этажа до верха вытяжной шахты, м; V – максимальная из средних скоростей ветра по румбам за январь с повторяемостью 16% и более, м/с; ρ_n и ρ_v – средняя плотность наружного и внутреннего воздуха, кг/м³, соответственно.

Слагаемое $0,03g\rho_n V^2$ в уравнении (1.32) представляет собой среднее динамическое давление p , Па. Разность давления с учетом особенностей аэродинамики зданий определяется по [31]:

$$\Delta p = 0,55gH_{зд}(\rho_n - \rho_v) + 0,25\rho_n K_{дин}(c_n - c_z)V^2; \quad (1.33)$$

где $K_{дин}$ – коэффициент, зависящий от высоты $H_{зд}$ и местности; c_n и c_z – аэродинамические коэффициенты на наветренной и подветренной стороне здания соответственно.

Для практических задач со сложной геометрией, поля давления ветра целесообразно рассчитывать с использованием системы дифференциальных уравнений (ДУ) Навье-Стокса осредненных по Рейнольдсу для несжимаемой вязкой жидкости [78]:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla[(\eta + \eta_t)(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \vec{F} \\ \nabla \vec{V} = 0 \end{cases}; \quad (1.34)$$

где $\vec{V} = \vec{V}(u; v; w)$ – вектор скорости движения воздуха (ветра), м/с; η – динамическая вязкость, Па·с; η_t – динамическая турбулентной вязкость, Па·с; ρ – плотность воздуха, кг/м³; $\vec{F}$ – удельное силовое поле, Н/м³.

Проблема при решении системы (1.34) заключается в том, что величина η_t является неизвестной и для её нахождения необходимо воспользоваться подходящей моделью турбулентности.

Количество воздуха, поступающее в помещения за счет воздухопроницаемости, зависит от сопротивления воздухопроницаемости конструкций R_u . Согласно [72] сопротивление воздухопроницаемости R_u , должно быть не менее требуемых значений $R_u^{тр}$. Для непрозрачных ОК, сопротивление воздухопроницанию

линейно зависит от разности давления:

$$R_u^{\text{тр}} = \Delta p / G_n; \quad (1.35)$$

Для окон и балконных дверей и фонарей зданий эта зависимость степенная

$$R_u^{\text{тр}} = (\Delta p / \Delta p_0)^{2/3} / G_n; \quad (1.36)$$

где $\Delta p_0 = 10$ Па ; G_n – нормируемая воздухопроницаемость ОК, кг/(м²·ч).

Количество наружного воздуха, поступающее в помещение через наружные стены и стыки конструкций кг/(м²·ч) определяется как [3]:

$$G = \Delta p / R_u. \quad (1.37)$$

Выводы к главе 1

1. На основании изучения литературных источников следует, состояние воздушной среды в зонах влияния полигонов ТБО и ПО нельзя признать удовлетворительным. Вопросы определения качества воздушной среды в зонах влияния полигонов, особенно в зонах застройки, расположенной вблизи полигонов, в настоящее время требуют дополнительного исследования.

2. Анализ методик расчета количества вредных компонентов биогаза, выделяющегося с полигонов ТБО и ПО показал, что известные методики расчёта эмиссии биогаза не учитывают в полной мере условия эксплуатации полигона. Наиболее перспективными методиками расчёта эмиссии биогаза являются «LANDgem» (EPA,2005) и ОАО «АКХ им. К.Д. Памфилова» (2004).

3. Из имеющихся методик расчёта загрязнения воздушной среды биогазом, наиболее перспективна методика, основанная на решении уравнений турбулентной диффузии. Однако она не учитывает реальную геометрию расчётной области, наличие на поверхности полигона изоляционной засыпки или газодренажных скважин. Результаты расчета будут также зависеть от выбора модели турбулентности.

4. Для снижения негативного влияния полигонов ТБО и ПО на состояние воздушной среды в жилых помещениях наиболее эффективным является

сбор, очистки и использование биогаза как альтернативного источника энергии. Недостатки существующих систем заключаются в том, что биогаз плохо очищается от влаги и пыли, что приводит к засорению фильтров. Низкое содержание метана в биогазе делает нежелательным для его сжигания использование горелок, работающих на природном газе. Существующие системы очистки биогаза необходимо объединить в комплексную систему очистки.

5. Результаты натурных обследований ряда полигонов ТБО и ПО, известные в литературе, целесообразно использовать для верификации разрабатываемой методики расчёта для оценки загрязнения воздуха в зонах влияния полигонов.

6. Для существующих полигонов целесообразно установить предельно-допустимый выброс биогаза, что позволит обеспечить экологически безопасную среду обитания в административных и жилых зданиях, расположенных в зонах их влияния.

2. АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО КАК ИСТОЧНИКОВ БИОГАЗА

2.1 Уравнения для эмиссии биогаза и газоэнергетического потенциала

Для расчёта эмиссии биогаза с полигонов автором настоящей работы предложено полуэмпирическое уравнение, учитывающее условия их эксплуатации.

Массу биогаза m , выделяющегося с полигона за период полного сбраживания T быстро разлагающейся органической части отходов массой M_0 , можно найти, интегрируя ДУ распада 1-го порядка в диапазоне $0 \leq t \leq T$:

$$m = \int_0^T -kL_m M_0 e^{-kt} dt = L_m M_0 (1 - e^{-kT}). \quad (2.1)$$

где L_m – масса биогаза, т, выделившегося при разложении 1 т отходов.

С другой стороны массу выделившегося биогаза за период T можно приближённо найти по методике ОАО «АКХ им. К.Д. Памфилова»:

$$m \approx Q_w M_0. \quad (2.2)$$

Тогда, приравнивая выражения (2.1) и (2.2): $L_m M_0 (1 - e^{-kT}) \approx Q_w M_0$, можно получить приближённую зависимость для определения L_m :

$$L_m \approx Q_w / (1 - e^{-kT}). \quad (2.3)$$

Если отходы не содержат жироподобных, углеводоподобных, белковых веществ, то выражение (2.3) для расчёта L_m не применимо. В этом случае значение L_m следует определять экспериментально или по справочным данным [89].

Если полигон ТБО и ПО оснащён системой утилизации биогаза, то это можно учесть путём введения коэффициента, учитывающего долю утилизации биогаза ξ . При полном отсутствии утилизации принимается $\xi = 1$, при её наличии ξ близок к нулю. Тогда по аналогии с уравнением (1.24) уравнение годового выхода массы l -го компонента биогаза m_l , т/год, в дискретной форме примет следу-

ющий вид [61,62,66]:

$$m_i = 0,1 \xi k \frac{c_i Q_w}{1 - e^{-kT}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 M_i e^{-kt_{ij}}; \quad (2.4)$$

где c_i – массовая доля компонента в составе биогаза при его образовании, численные значения которой приведены в источнике [84].

Учёт аэробных и анаэробных процессов, протекающих в теле полигона, предлагается осуществлять путём ввода в уравнение (2.4) поправочных коэффициентов, приведённых в источниках [35,56]:

$$m_{CH_4} = 0,1 c_{CH_4} k f \xi Q_w \frac{1 - OX}{1 - e^{-kT}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 M_i e^{-kt_{ij}}; \quad (2.5)$$

где $c_{CH_4} = 0,7$ – максимальная массовая доля метана в биогазе; f – коэффициент условий эксплуатации полигона: для полуанаэробных полигонов, оснащённых системой дренажа биогаза, имеющих проницаемый покрывающий слой $f = 0,5$; для свалок с глубиной от 5 м и/или вблизи залегания грунтовых вод, при размещении отходов в водной среде $f = 0,8$; для свалок с глубиной до 5 м $f = 0,4$ [53]; OX – коэффициент, зависящий от слоя изоляции: для управляемых полигонов с использованием грунта $OX = 0,1$; для остальных $OX = 0$ [36,53].

По уравнениям 2.4-2.5 выполнен расчёт в программном пакете «Langem 3.2» для полигонов, приведённых в главе 1. Среда принята увлажнённой, полигоны – полуанаэробными, содержание органической составляющей $R = 55\%$, жироподобных веществ $J = 2\%$, углеводоподобных $U = 83\%$, белковых $B = 15\%$, влажность $\varphi = 47\%$.

Информация об объёме отходов, поступающих на полигоны ПТО-1 «Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки» за 1983-2000 годы приведена в работе [77]. Средняя плотность неуплотнённых отходов принята 230 кг/м^3 , уплотнённых – 670 кг/м^3 . Массу захороненных отходов на полигонах за другие годы можно получить с помощью экстраполяции, считая, что объём поступающих отходов с каждым годом возрастает примерно на 3% в год [17]. Результаты расчётов приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Масса отходов в тоннах, захороненных на полигонах ПТО-1 «Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки» за различные годы эксплуатации

Год	Полигон		Год	Полигон		Год	Полигон	
	ПТО-1	ПТО-3		ПТО-1	ПТО-3		ПТО-1	ПТО-3
1972	-	337265	1986	299000	552000	2000	368000	437000
1973	-	347695	1987	322000	565800	2001	390411	450110
1974	-	358449	1988	345000	464600	2002	402124	450110
1975	-	369535	1989	437000	460000	2003	414187	463613
1976	-	380964	1990	391000	579600	2004	426613	450111
1977	-	392746	1991	368000	570400	2005	439411	463614
1978	158007	404893	1992	322000	554300	2006	452594	450112
1979	162894	417416	1993	299000	437000	2007	466171	463615
1980	167932	430325	1994	391000	416300	2008	480157	450113
1981	173126	443634	1995	414000	368000	2009	494561	463616
1982	178480	457355	1996	437000	322000	2010	509398	450114
1983	184000	471500	1997	448500	340400	2011	524680	463617
1984	207000	494500	1998	460000	338100	2012	540420	450115
1985	253000	568100	1999	345000	402500	2013	390411	463618

Для перевода единиц измерения т/год в кг/сут. результаты умножаются на дробь $1000/T_{\text{тепл}}$. Результаты расчётов эмиссии приведены в виде графиков в Приложении 1. Сравнение расчётов и замеров приведено в таблицах 2.2 и 2.3.

Таблица 2.2 – Значения суточных эмиссий компонентов биогаза на полигоне ПТО-1 «Волхонский» в 2001 г., полученные различными способами

Компонент биогаза	Эмиссия, кг/сут [$\text{м}^3/\text{сут.}$]	
	Экспериментальная* [69]	Расчётная
Метан	27700,00	28476,98
	[43210,00]	[42685,84]
Углекислый газ	94300,00	95468,00
	[51200,00]	[52168,15]
Бензол	7,90	7,69
Толуол	35,00	36,22
Этилбензол	51,00	48,91
Ксилолы	3,30	3,34

* Получено с относительной погрешностью 2%

Таблица 2.3 – Значения суточных эмиссий компонентов биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки» в 2001 г., полученные различными способами

Компонент биогаза	Эмиссия, кг/сут [$\text{м}^3/\text{сут}$]	
	Экспериментальная * [69]	Расчётная
Метан	5730,00	5908,80
	[8950,00]	[9155,39]
Углекислый газ	26800,00	28488,84
	[14200,00]	[15469,02]

* Получено с относительной погрешностью 2%

С помощью уравнений (2.4) и (2.5) выполнены расчёты эмиссии метана, углерода оксида, аммиака, бензола на полигоне «Центральный». Результаты расчётов приведены на рисунках 2.1 а, б.

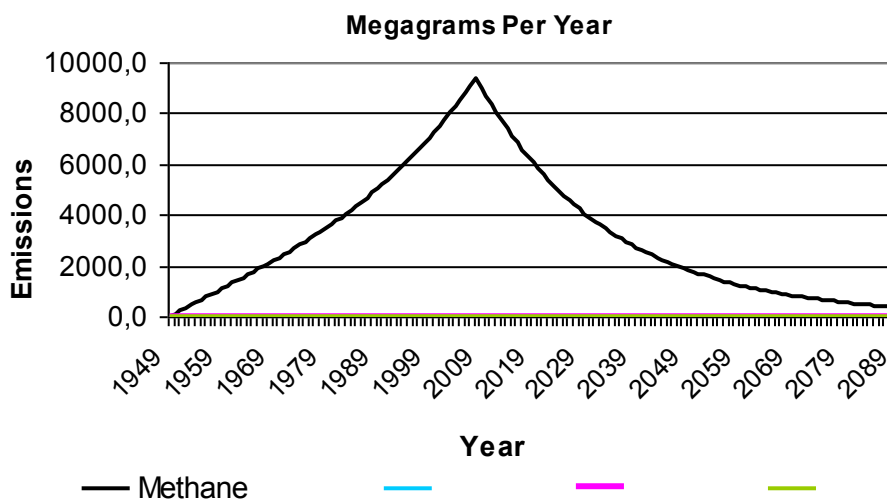


Рисунок 2.1 а – Эмиссия биогаза на полигоне «Центральный» Волгограда, т/год

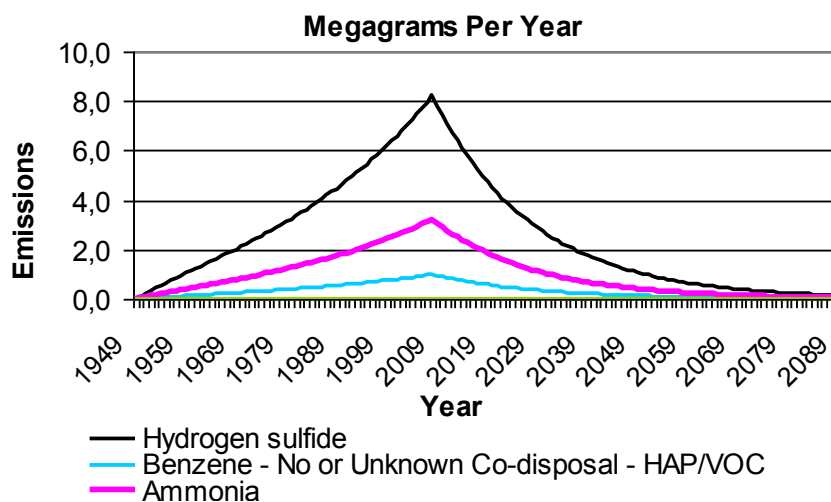


Рисунок 2.1 б – Эмиссия биогаза на полигоне «Центральный» Волгограда, т/год

Обозначения на рисунках 2.1 а-б: Methane – метан; Benzene - No or Unknown Co-disposal - НАР/VOC – бензол (при неизвестных или неточных данных о содержании); Ammonia – аммиак; Hydrogen sulfide – сероводород.

Уравнения (2.4) и (2.5) позволяют:

- спрогнозировать время, когда интенсивность выделения биогаза достигнет наивысшего (пикового) значения;
- рассчитать необходимое количество реагентов для очистки биогаза от балласта при энергетическом использовании.

Газоэнергетический потенциал полигона можно оценить величиной $V_{\text{прир.газа}}$, тыс.м³, показывающей, какое количество природного газа можно сберечь, используя для газоснабжения весь выделившийся метан, предлагается рассчитывать как:

$$V_{\text{прир.газа}} = \chi m_{\text{CH}_4} k_{\text{сж.газа}} / k_{\text{прир.газа}} \quad (2.6)$$

где χ – коэффициент, учитывающий утечки при добыче и поставке газа (в большинстве стран $\chi = 0,99$); $k_{\text{сж.газа}} = 1,57$ и $k_{\text{прир.газа}} = 1,154$ – коэффициенты перевода в тонны условного топлива (т.у.т.) для сжиженного и природного газа [47].

Например, в период с 1949 г. по 2089 г. на полигоне «Центральный» Волгограда выделится 450909 т метана, что эквивалентно $450909 \cdot 0,99 \cdot 1,57 = 700847,86$ т.у.т., тогда газоэнергетический потенциал полигона будет в эквиваленте $700847,86 / 1,154 = 607320,502$ тыс. м³ природного газа.

2.2 Расчёт количества, площади сечения и дебета газодренажных скважин

Для расчётов загрязнения атмосферы и проведения сбора биогаза из газодренажных скважин, необходимо определить их технические характеристики такие как количество, площадь сечения, количество выходящего из скважины компонента биогаза (дебет).

Считая, что давление на поверхности полигона практически не отличается от атмосферного, объём выбрасываемого биогаза Q , м³/сек., можно найти с помощью уравнения состояния для смеси идеальных газов:

$$Q = k_{\text{перев}} T \sum_{l=1}^N (m_l R_l) / (T_{\text{тёпл}} p_{\text{атм}}); \quad (2.7)$$

где $k_{\text{перев}} = 11574,07$ – коэффициент перевода единицы измерения т/год в мг/сек. С учётом тёплого периода года; T – температура газо-воздушной смеси, $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; R_l – газовая постоянная, Дж/(кг·К·моль); N – количество компонентов биогаза, по которым ведётся расчёт.

Тогда произведение площади сечения и числа скважин можно найти с помощью зависимости:

$$n_{\text{скв}} S_{\text{скв}} = k_{\text{перев}} T \sum_{l=1}^N m_l R_l / (T_{\text{тёпл}} p_{\text{атм}} \vartheta_{\text{биогаза}}); \quad (2.8)$$

а удельную массу компонента биогаза $m_{l\text{скв}}$, мг/сек, выбрасываемого из каждой скважины, с помощью зависимости:

$$m_{l\text{скв}} = k_{\text{перев}} m_l p_{\text{атм}} \vartheta_{\text{биогаза}} S_{\text{скв}} / (T_{\text{тёпл}} T \sum_{l=1}^N m_l R_l). \quad (2.9)$$

2.3 Учёт характеристик полигонов ТБО и ПО как неоднородных объёмных источников выброса примеси в воздушную среду

При отсутствии газодренажных скважин необходимо учитывать неоднородность эмиссии биогаза по высоте и площади полигона. Для полигонов, как правило, принимается расчётная схема «усечённая пирамида» [29,68] (на практике они могут иметь форму и неправильной усечённой пирамиды, а количество граней варьироваться). Выброс биогаза в атмосферу производится со всех граней полигона кроме нижней из-за её изоляции. В работе [57] автором настоящей работы был приведён учёт формы и неоднородности эмиссии биогаза по высоте и площади полигонов. Поверхность полигона представляется как ступенчатая пирамида с множеством бесконечно малых участков площадью каждый dA , м^2 , и задаётся система координат xuz с началом по середине основания полигона (рисунок 2.2).

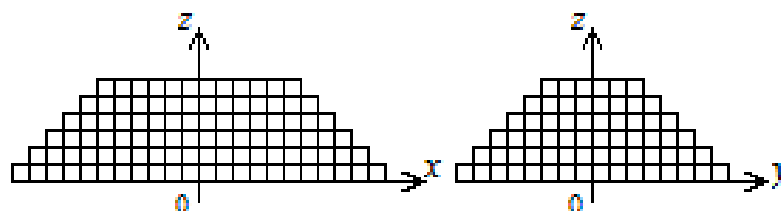


Рисунок 2.2 – Схема разбивки поверхности полигона на группу участков

На каждом участке будет эмиссия компонента биогаза массой dm_l , т/год. Масса выделившегося компонента биогаза с единицы объёма полигона обозначается как q_v , т/(м³·год), а глубина залегания отходов – аппликатой участка Z , м. В соответствии с уравнением (1.27) это можно выразить как:

$$dm_l = q_v Z dA. \quad (2.10)$$

Разделив обе стороны уравнения на dA , получим уравнение удельной эмиссии компонента биогаза на участке, которую обозначенной как $m_{уд}$, т/(год·м²):

$$m_{уд} = dm_l / dA = q_v Z. \quad (2.11)$$

Т.к. полигоны ТБО и ПО функционируют на протяжении многих лет, а отходы поступают на них постепенно, то различные слои отходов имеют разную интенсивность разложения. По мере разложения отходов в теле полигона образуются пустоты, а большинство полигонов снабжено системой дрен, канальцев, поэтому допускается, что содержание биогаза в различных участках тела полигона выравнивается, т.е. происходит гомогенизация. Тогда справедливо приближение:

$$q_v \approx m_l / V_{пол} \quad (2.12)$$

где $V_{пол}$ – объём, занимаемый полигоном, м³.

Масса выбрасываемого l -го компонента биогаза с участка полигона $m_{луч}$, мг/(сек·м²), с учётом приближения (2.12) будет определяться с помощью полученного автором уравнения:

$$m_{луч} \approx k_{перев} m_l Z / (T_{тепл} V_{пол}). \quad (2.13)$$

Если полигон разбит на группу участков (карт), которые используются в разное время, то каждый из них по данной схеме разбивается отдельно. Эта схема

применима, если поверхность полигона не покрыта изоляционной засыпкой.

В работе [56] автор также учел влияние засыпки на поверхности полигона. На участке полигона задаётся местная система координат $x_i y_i z_i$, её начало лежит на поверхности участка (рисунок 2.3). Биогаз, будучи выбрасываемым в атмосферу, пересекает границу «Земля-воздух».

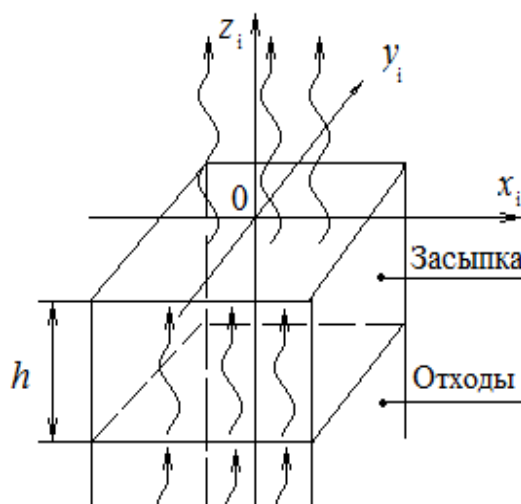


Рисунок 2.3 – Участок полигон с грунтовой засыпкой в системе координат $x_i y_i z_i$

Прохождение потока эмиссией $m_{\text{луд}}$ через слой изоляции описывается уравнением диффузии газа в грунте [20]:

$$k_{\text{перев}} m_{\text{луд}} / T_{\text{тепл}} = D \nabla c; \quad (2.14)$$

где D – диффузивность, $\text{м}^2/\text{с}$, определяемая как [20]:

$$D = \chi(n_{\text{г}} - W)D_0; \quad (2.15)$$

где χ – коэффициент извилистости грунта; $n_{\text{г}}$ – пористость грунта; W – объёмная влажность грунта; D_0 – коэффициент диффузии газа в воздухе. Значения диффузивности грунтов при различной температуре приведены в таблице 2.4, а зависимость пористости грунта от влажности – на рисунке 2.4.

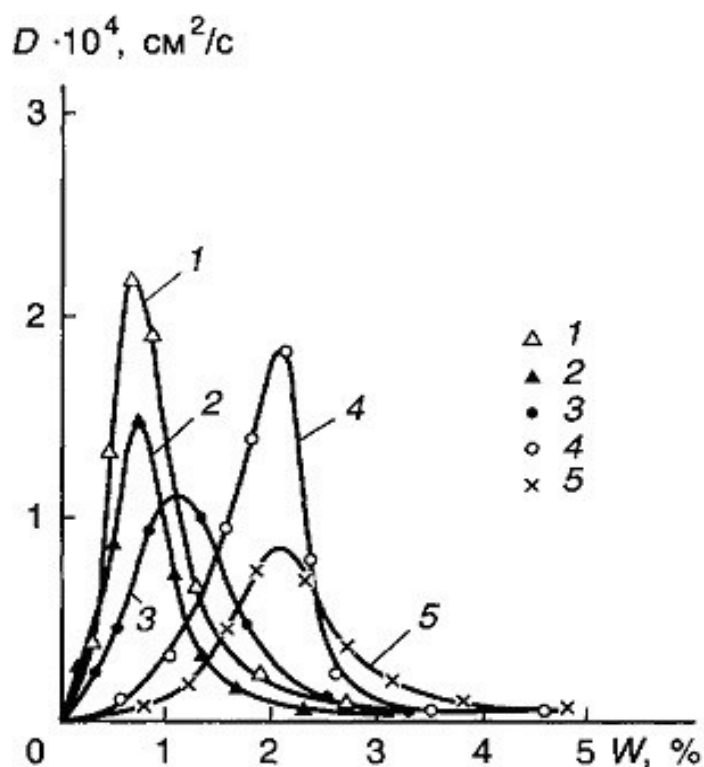


Рисунок 2.4 – Зависимость диффузивности от влажности [20]: 1 – лёгкий лёссовидный суглинок; 2 – лёсс легкосуглинистый крупнопылеватый; 3, 4 – средние лёссовидные суглинки; 5 – тяжёлый лёссовидный суглинок

Таблица 2.4 – Диффузивность грунтов при различной температуре [20]

Грунт	Влаж-ность, %	Порис-тость, %	Диффузивность D , $\text{см}^2/\text{с}$ при температуре, $^{\circ}\text{C}$		
			1°	20°	40°
Лёсс легкосуглинистый	0,75	45	$3,4 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$
Суглинок средний	0,75	42	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$1,0 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
Суглинок тяжёлый	1,5	51	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$9,0 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$
Глина средняя	1	42	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$7,6 \cdot 10^{-4}$
Глина средняя	3	37	$4,8 \cdot 10^{-6}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	$3,8 \cdot 10^{-5}$
Глина тяжёлая	7,5	52	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$8,3 \cdot 10^{-6}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$

Считая, что эмиссия биогаза однородна по площади участка, участок можно рассматривать независимо от остальных, тогда горизонтальной диффузией в его

пределах можно пренебречь, т.е. $\frac{\partial c_i}{\partial x_i} \approx \frac{\partial c_i}{\partial y_i} \approx 0$, а уравнение (2.14) примет вид:

$$k_{\text{перев}} \frac{m_{\text{уд}}}{T_{\text{тёпл}}} = D \frac{\partial c_i}{\partial z_i}. \quad (2.16)$$

Компоненты биогаза, на момент его выделения в теле полигона, уже содержатся в начальной концентрации $c_{\text{комп}}$, мг/м³. При этом в теле полигона часть объёма занимают отходы пористостью $n_{\text{отх}} = 0,33$ [35]. Тогда концентрация биогаза будет $c_{\text{комп}} n_{\text{отх}}$. По мере прохождения потока через грунтовую засыпку и приближении к её поверхности, концентрация компонента понизится до $c_{\text{пов,гр}}$. Проинтегрировав уравнение (2.16) по толщине изоляционной засыпки h , получим:

$$\int_{-h}^0 \frac{11574,07}{T_{\text{тёпл}}} m_{\text{уд}} dz_i = m_{\text{уд}} h = \frac{312500}{27 T_{\text{тёпл}}} \int_{n_{\text{отх}} c_{\text{комп}}}^{c_{\text{пов,гр}}} D dc_i = D(c_{\text{пов,гр}} - n_{\text{отх}} c_{\text{ср}})$$

или

$$k_{\text{перев}} m_{\text{уд}} / T_{\text{тёпл}} = D(c_{\text{пов,гр}} - n_{\text{отх}} c_{\text{комп}}) / h. \quad (2.17)$$

Биогаз при переходе в воздушную среду из засыпки, может частично ей удерживаться. Удерживаемый поток примеси в грунте J , мг/(м³сек.), можно выразить уравнением [8]:

$$J = \gamma c_{\text{пов,возд}}; \quad (2.18)$$

где $\gamma = 0,001-0,0015$ м/сек – коэффициент просачивания; $c_{\text{пов,возд}}$ – концентрация компонента биогаза на верхней границе засыпки со стороны воздуха, мг/м³.

Тогда переход биогаза через земельно-воздушную границу можно выразить как $k_{\text{перев}} m_{\text{уд}} / T_{\text{тёпл}} = D(c_{\text{пов,гр}} - n_{\text{отх}} c_{\text{комп}}) / h + \gamma c_{\text{пов,возд}}$. С помощью полученного автором уравнения можно найти концентрацию компонента биогаза на поверхности полигона ТБО и ПО, покрытого изоляционной засыпкой:

$$c_{\text{пов,возд}} = \frac{T_{\text{тёпл}} D n_{\text{отх}} c_{\text{комп}} V_{\text{пол}} + k_{\text{перев}} m_{\text{комп}} Zh}{T_{\text{тёпл}} V_{\text{пол}} (D + \gamma h)}. \quad (2.19)$$

Выводы к главе 2

1. Предложены полуэмпирические зависимости на основе модели «LandGEM» с учётом известных в литературе методик расчёта и экспериментальных исследований.
2. Предложена зависимость для оценки газознергетического потенциала полигонов ТБО и ПО в эквиваленте тыс. м³ природного газа.
3. Предложены зависимости для расчёта площади сечения, количества и дебета газодренажных скважин.
4. Выполнен учёт характеристик полигонов ТБО и ПО как неоднородных объёмных источников выброса примеси в воздушную среду.

3. НАТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ БИОГАЗОМ С ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО

3.1 Натурные исследования температуры биогаза, выбрасываемого с полигонов ТБО и ПО

В толще полигонов при разложении отходов происходит тепловыделение. Основными источниками тепла являются аэробные процессы, протекающие в основном в поверхностном слое вновь поступивших отходов на глубине до 1,5-2 м. По мере преобладания анаэробных процессов над аэробными происходит снижение температуры. Процессы гомогенизации отходов при их разложении приводят к внутренней диссипации энергии, т.е. существенному повышению энтропии системы [38,82]. В составе отходов содержится влага (осадки, фильтрат), теплоёмкость которой выше, чем у остальных компонентов, которая осаждается к основанию полигонов и отводится через систему дрена (на контролируемых полигонах). Вследствие чего происходит охлаждение полигонов ТБО и ПО. В настоящее время влияние тепловыделения при разложении ТБО и ПО на температуру биогаза не исследовано.

Для определения температуры биогаза, выделяющегося с поверхности полигонов ТБО и ПО производилась тепловизионная съёмка поверхностей ряда полигонов:

- полигон ТБО «Некрасовка» г. Люберцы Московской области 17.09.12 при температуре воздуха +14...+16°C, относительной влажности воздуха 71%;
- полигон ПО «Приморская Свалка» ПТО-1, «Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки» г. Санкт-Петербурга 27.09.12 при температуре воздуха +14...+16 °C, относительной влажности воздуха 82%;
- свалка в селе Усть-Вымь Республики Коми 24.09.12 при температуре воздуха +12...+13°C, относительной влажности воздуха 70%.

Измерения проводились в соответствии с РД 153-34.0-20.364-00 [49] с по-

мощью тепловизора Testo 875-2 (Свидетельство о поверке ФБУ «Ростест-Москва» №198944/442 до 27.07.13).

Скорость ветра определялась с помощью анемометра Testo 410-1 (Свидетельство о поверке ФБУ «Ростест-Москва» №184823 до 02.08.13) и термогигрометра Testo 610-H1 (Свидетельство о поверке ФБУ «Ростест-Москва» №204226 до 02.08.13).

Степень черноты тел принималась по справочным данным [90]. Обработка термограмм производилась с помощью программного пакета «Testo IRSOFT 3.2». Результаты обработки термограмм, приведённые в таблице 3.1 и опубликованные в работе [59], показывают, что высоких перепадов температур на термограммах не выявлено и выброс биогаза в воздушную среду можно считать «холодным», что позволило не учитывать температурный фактор:

$$T \approx T_{\phi}; \quad (3.1)$$

где T_{ϕ} – фоновая температура атмосферного воздуха, К.

Таблица 3.1 – Результаты тепловизионной съёмки поверхностей различных полигонов ТБО и ПО

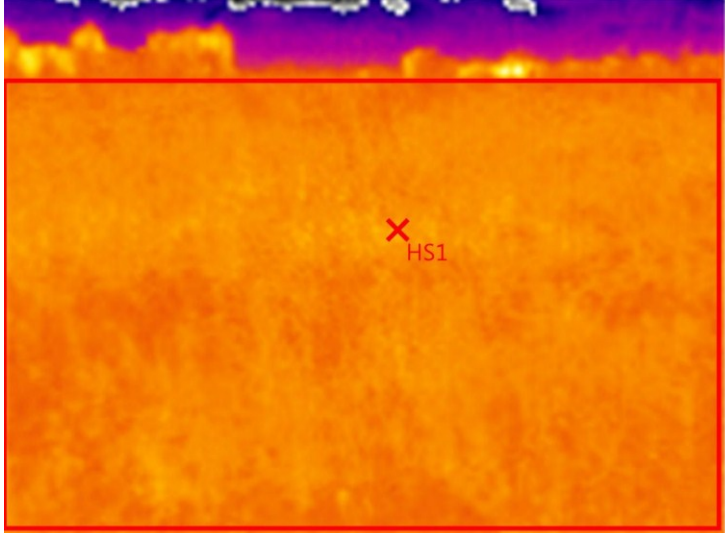
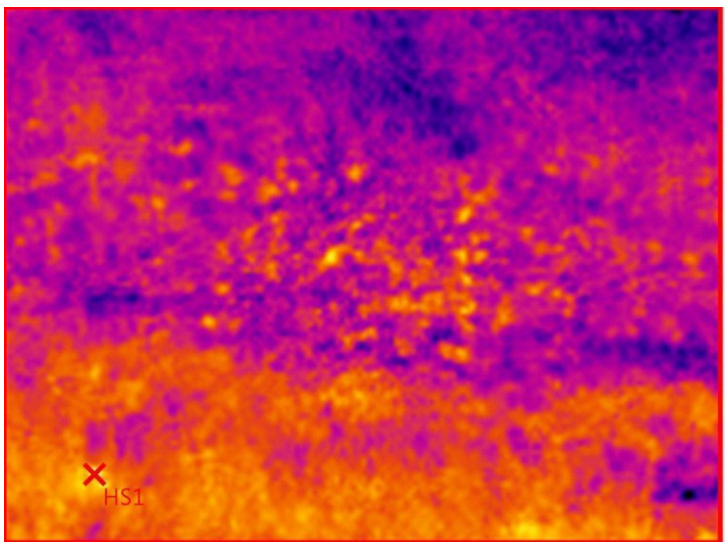
Термограмма	Фотофиксация	Описание
 14,6 °C 12,5 10,0 7,5 5,0 4,1 °C HS1		Полигон ТБО «Некрасовка» г. Люберцы Московской области. Наибольшая температура – 12,4°C, наблюдаемая в точке HS1
 13,4 °C 13,0 12,5 12,0 11,5 11,0 10,6 °C HS1		Основание полигона «Некрасовка» г. Люберцы Московской области. Наибольшая температура – 13,8°C в точке HS1, наблюдаемая в районе стока фильтрата

Таблица 3.1 – Результаты тепловизионной съёмки поверхностей различных полигонов ТБО и ПО (продолжение)

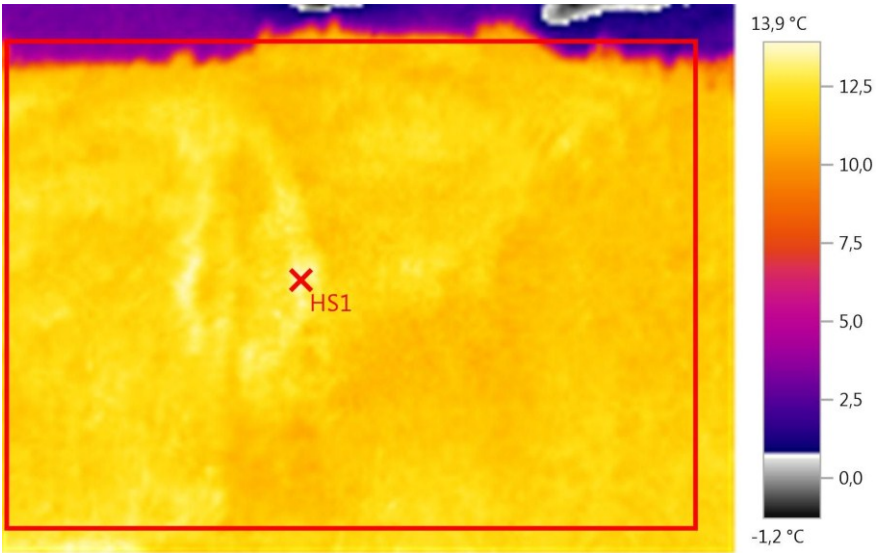
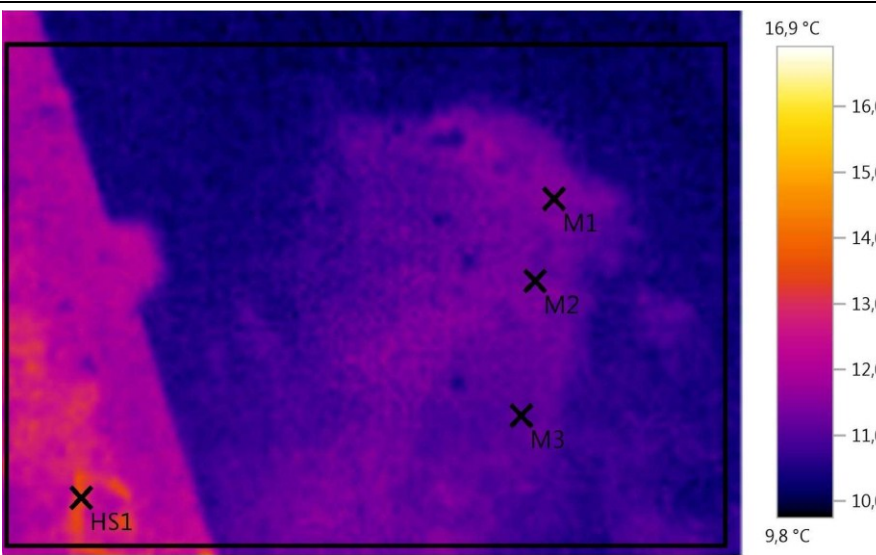
Термограмма	Фотофиксация	Описание
 13,9 °C 12,5 10,0 7,5 5,0 2,5 0,0 -1,2 °C HS1		Свалка в селе Усть-Вымь Республики Коми. Наибольшая температура – 13,9°C, наблюдаемая в точке HS1
 16,9 °C 16,0 15,0 14,0 13,0 12,0 11,0 10,0 9,8 °C HS1 M1 M2 M3		Сток фильтрата в отводящий канал у основания полигона «Приморская свалка». В точке HS1 температура – 13,8°C, в точках M1, M2, M3 11,5; 11,4; 11,1°C

Таблица 3.1 – Результаты тепловизионной съёмки поверхностей различных полигонов ТБО и ПО (продолжение)

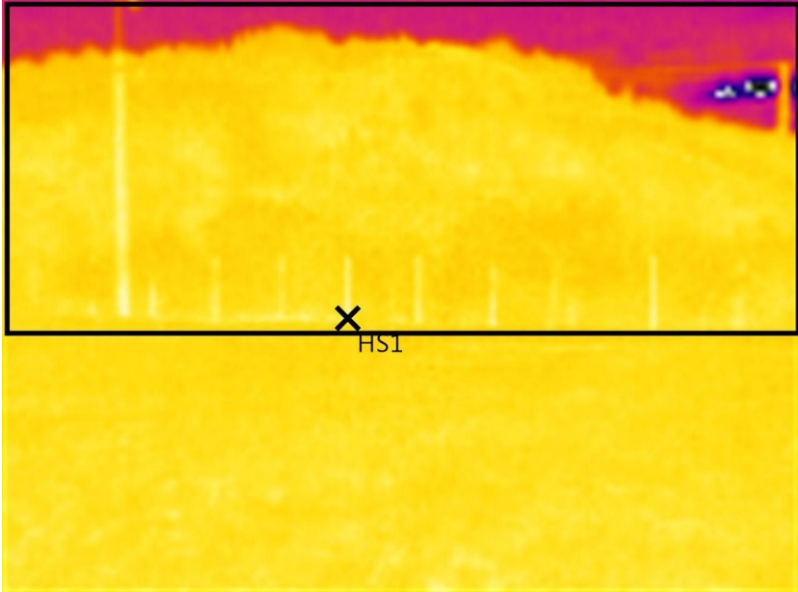
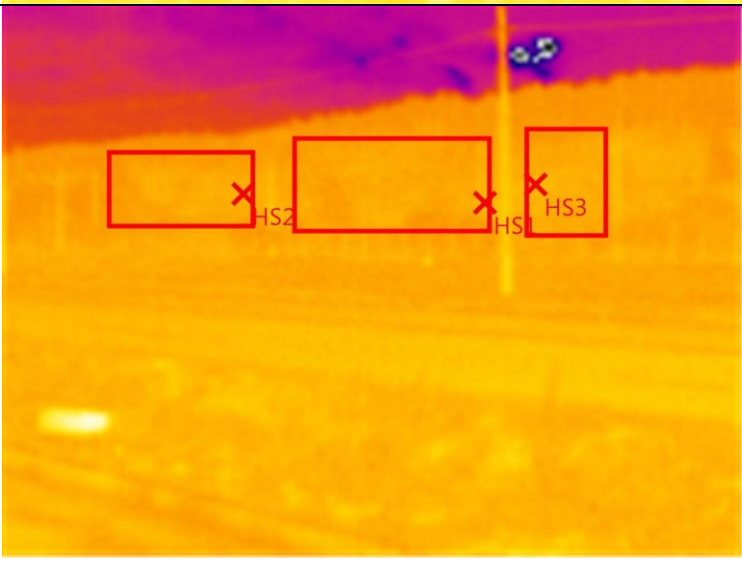
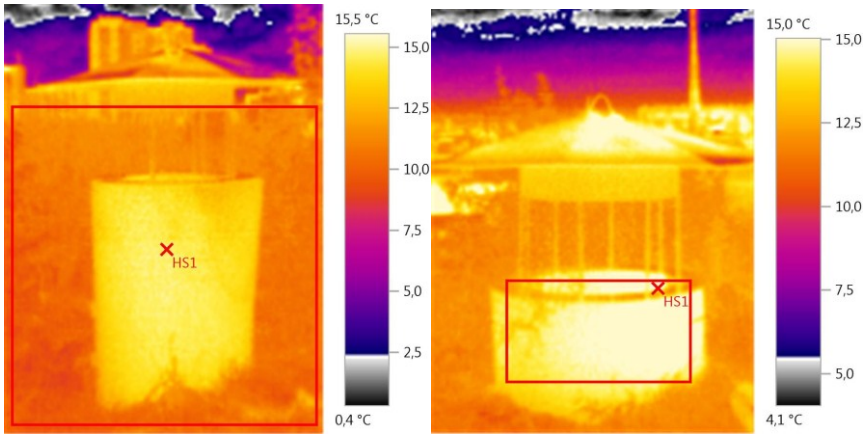
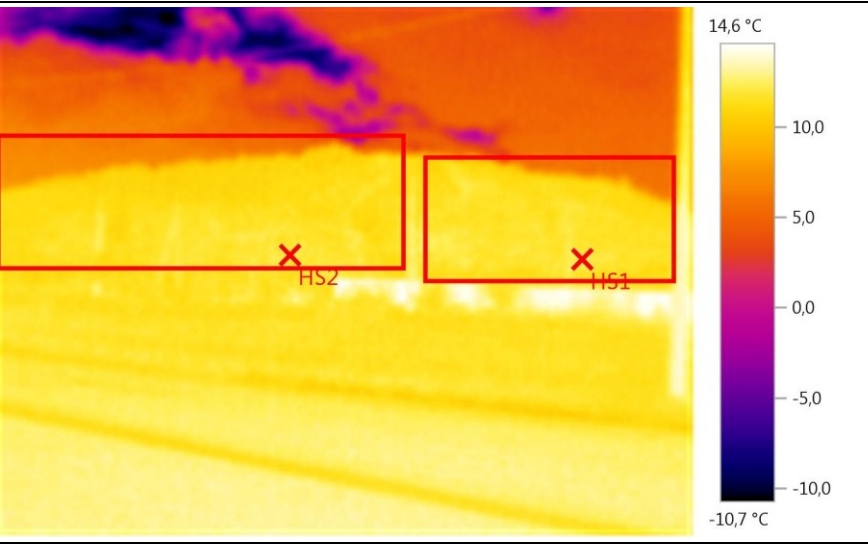
Термограмма	Фотофиксация	Описание
 13,8 °C 12,5 10,0 7,5 5,0 2,5 0,0 -2,5 -5,0 -7,5 °C HS1		Полигон «Приморская свалка». Наибольшая температура – 13,8°С в точке HS1
 16,4 °C 15,0 12,5 10,0 7,5 5,0 2,5 0,0 -2,5 -5,0 -7,5 -8,5 °C HS2 HS1 HS3		Полигон «Приморская свалка». В точках HS1, HS2 и HS3 наблюдается температура 12,2; 12,8 и 12,2°С соответственно

Таблица 3.1 – Результаты тепловизионной съёмки поверхностей различных полигонов ТБО и ПО (продолжение)

Термограмма	Фотофиксация	Описание
		Газодренажные скважины «Приморской свалки». Наибольшая температура – 15,1°C в точке HS1
		Полигон ПТО-1 «Волхонский». В точках HS1 и HS2 наблюдается температура 12,5°C

Приближение (3.1) позволяет привести к следующему виду уравнения для определения характеристик газодренажных скважин:

– произведения площади сечения и числа скважин

$$n_{\text{скв}} S_{\text{скв}} = k_{\text{перев}} T_{\text{ф}} \sum_{l=1}^N m_l R_l / (T_{\text{тёпл}} p_{\text{атм}} g_{\text{биогаза}}); \quad (3.2)$$

– удельной массы компонента биогаза $m_{\text{уд}}$, выбрасываемого из каждой скважины

$$m_{l\text{скв}} = k_{\text{перев}} m_l p_{\text{атм}} g_{\text{биогаза}} S_{\text{скв}} / (T_{\text{тёпл}} T_{\text{ф}} \sum_{l=1}^N m_l R_l). \quad (3.3)$$

3.2 Натурные исследования загрязнения биогазом воздушной среды зданий ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» и завода «Nissan»

Автором выполнялись натурные исследования загрязнения биогазом воздушной среды в зоне влияния полигона ПТО-3 «Новосёлки». Измерения концентраций проводились перед наветренным фасадом жилого здания многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице», а также наружного воздуха на границе СЗЗ полигона вблизи складских зданий автомобильного завода «Nissan».

Для оценки качества воздуха в жилых помещениях выбрана комната на 1-м этаже, площадью 18 м², объёмом 46 м³. Оконный блок в комнате представляет собой однокамерный стеклопакет размером 1,7х1,4 м. Окно ориентировано в сторону полигона. Размеры дверного проёма составляют 2,05х0,8 м. Температура на поверхности радиатора составляет 66,1±0,5°С. Измерения проводились при закрытых форточках. Поступление вредных веществ осуществлялось только за счёт воздухопроницаемости ОК.

Из помещения воздух удалялся через щель высотой 1 см под закрытой дверью. Наружные стены состоят из монолитного железобетона с наружной теплоизоляцией минеральной ватой.

Эксперимент проводился 11.03.14 при атмосферном давлении 763 мм рт. ст., при наиболее неблагоприятном – северо-западном направлении ветра со скоростью 5,1 м/с. Фоновая концентрация в воздухе аммиака составляла 0,019 мг/м³,

бензола – 0,012 мг/м³.

В ходе исследований выполнялись измерения средней разности давления воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК, средних температур воздуха, разовых концентраций двух наиболее распространённых опасных компонентов биогаза – аммиака и бензола.

Для проведения замеров использовалось следующее оборудование:

1. Микроманометр жидкостный компенсационный с микрометрическим винтом МКВ-250 (Свидетельство о поверке ФБУ «Тест-С.-Петербург» №0219160 до 28.10.15) – для измерения средней разности давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК;

2. Термогигрометр Testo 605-H1 (Свидетельство о поверке ФБУ «Ростест-Москва» №204226 до 02.08.14) – для измерения температуры и относительной влажности воздуха снаружи и внутри помещения;

3. Термометр контактный цифровой ТК-5.04 (Свидетельство о поверке ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева» №Н241-3/1662 до 31.07.14) – для измерения температуры на поверхности отопительного прибора;

4. Газоанализатор универсальный УГ-2 (Свидетельство о поверке ФБУ «Псковский ЦСМ» №1301 до 06.05.14) – для измерения разовых концентраций аммиака и бензола.

Схема проведения эксперимента приведена на рисунке 3.1.

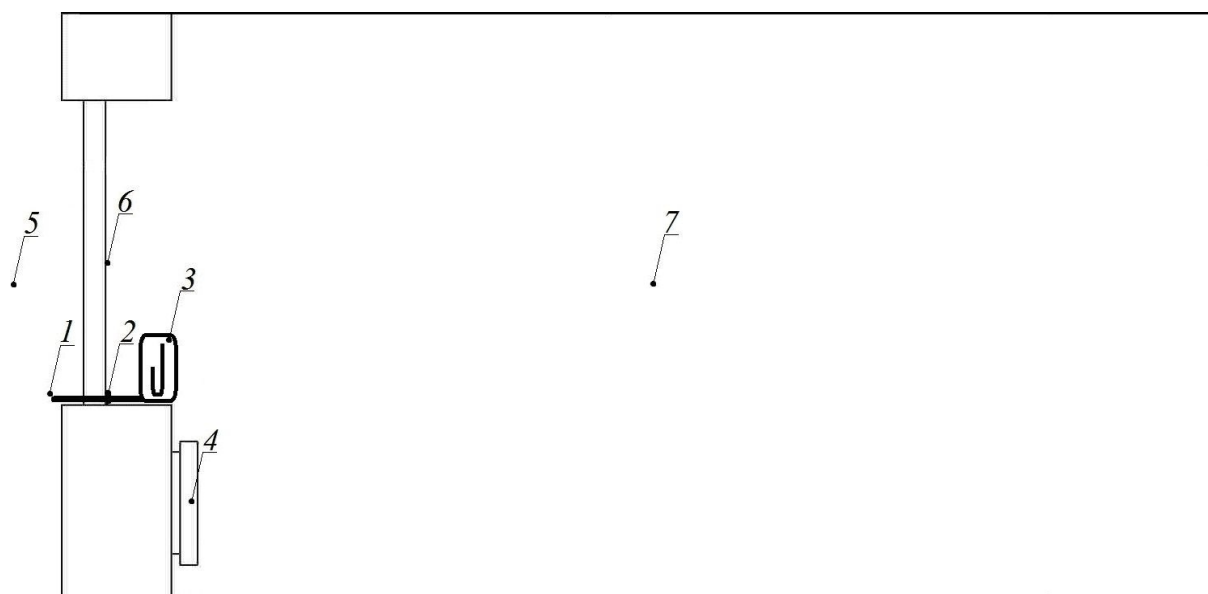


Рисунок 3.1 – Схема проведения эксперимента по определению загрязнённости помещения: 1 – трубка, выходящий наружу здания; 2 – слой оконной замазки; 3 – микроманометр; 4 – отопительный прибор; 5 – точка замера температуры, относительной влажности воздуха и концентраций компонентов биогаза снаружи здания; 6 – стеклопакет; 7 – точка замера температуры, относительной влажности воздуха и концентраций компонентов биогаза внутри здания

Разность давления определялась с помощью микроманометра 3.

В точках 5 и 7 производились измерения температуры, относительной влажности воздуха, концентраций аммиака и бензола. Отборы проб наружного воздуха производились с помощью насоса и пластиковых пакетов. Определение концентраций примесей в воздухе выполнялось при комнатной температуре. Измерение температуры производилось также на поверхности отопительного прибора 4. Результаты замеров приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Результаты замеров 11.03.14 внутри и снаружи помещения

Измеряемый параметр		Снаружи помещения	Внутри помещения
Относительная влажность воздуха, %		73±3	40±3
Температура воздуха, °C		5,6±0,5	20,1±0,5
Разовая концентрация, мг/м ³	Аммиака	5,0±1,0	2,5±0,6
	Бензола	5,0±1,0	2,0±0,5
Средняя разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК, мм вод. ст.		2,60±0,05	

Порог чувствительности аммиака составляет $2,2 \text{ мг/м}^3$, бензола – 5 мг/м^3 , т.е. показания газоанализатора косвенно подтверждаются органолептически.

Перевод показаний микроманометра из мм вод. ст. в Па выполнялся по уравнению [40]:

$$\Delta p = h_m K_m g_m; \quad (3.4)$$

где h_m – показание микроманометра, мм вод. ст.; K_m – поправочный коэффициент, зависящий от температуры воздуха, при 20°C $K_m = 0,99702$; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения, м/с^2 .

По результатам эксперимента вблизи складских зданий завода «Nissan» 11.03.14 разовая концентрация аммиака составила $12,3 \pm 3,1 \text{ мг/м}^3$, бензола – $11,9 \pm 3 \text{ мг/м}^3$.

Разовые концентрации $c_{\text{раз}}$, мг/м^3 , полученные при исследованиях пересчитывались на среднесуточные $c_{\text{ср.сут}}$, мг/м^3 , по выражению [74]:

$$c_{\text{раз}} = \Psi c_{\text{ср.сут}} \quad (3.5)$$

где Ψ – отношение среднесуточной концентрации к разовой, зависит от расстояния до источника (полигона ТБО и ПО), ветрового режима территории, времени осреднения.

Из анализа результатов эксперимента следует, что, несмотря на то, что здания находятся на расстоянии от полигона ТБО и ПО, превышающем размер СЗЗ, при наиболее неблагоприятном направлении ветра наблюдается превышение среднесуточной ПДК загрязняющих веществ в воздухе для населённых мест и закрытых помещений.

Полученные результаты целесообразно использовать для верификации математической модели загрязнения биогазом внутренней воздушной среды здания.

Выводы к главе 3

1. С помощью тепловизионной съёмки ряда полигонов ТБО и ПО установлено, что температура биогаза примерно равна фоновой температуре наружно-

го воздуха, т.е. выброс биогаза можно считать «холодным».

2. Произведены натурные исследования загрязнения наружного и внутреннего воздуха в зданиях, расположенных вблизи полигона ТБО и ПО наиболее распространёнными и опасными компонентами биогаза – аммиаком и бензолом при неблагоприятном направлении ветра. Полученные результаты целесообразно использовать для верификации математической модели загрязнения биогазом внутренней воздушной среды здания.

4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ В ЗОНАХ ВЛИЯНИЯ ПОЛИГОНОВ ТБО И ПО

4.1 Расчёт загрязнения наружного воздуха вблизи полигона ТБО и ПО

4.1.1 Система исходных уравнений

Общепризнанная программа «Эколог» для расчета загрязнения воздуха от разных типов источников, включая площадные, дает хорошие результаты на больших расстояниях при сравнительно ровной подстилающей поверхности. Однако разрешающая способность программы не достаточна, чтобы получить достоверные значения концентраций вредных веществ в застройке, расположенной на расстоянии нескольких километров от полигонов, особенно при прогнозировании загрязнения воздуха внутри зданий. Следует также напомнить, что полигоны представляют собой объемные источники. Вследствие этого автором предложена методика для прогнозирования загрязнения качества воздуха вблизи внутри зданий, в основе которой лежит решение системы ДУ гидрогазодинамики, теплопроводности, диффузии.

При записи уравнений используется Декартова система координат x, y, z . Оси x и y совпадают с поверхностью земли, ось z направлена вертикально вверх.

Рассеивание пассивной примеси концентрацией c , мг/м^3 , описывается нестационарным ДУ турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \nabla(c\vec{V} - k_{xyz}\nabla c) + \vec{w}_s \frac{\partial c}{\partial z} = I(\vec{r}; t); \quad (4.1)$$

где $k_{xyz} = \text{diag}\{k_x; k_y; k_z\}$ – кинематическая турбулентная вязкость для анизотропной среды, $\text{м}^2/\text{с}$; $\vec{w}_s$ – средняя скорость подъёма или оседания примеси [75]; $I(\vec{r}; t)$ – функция эмиссии примеси в атмосферу:

$$I(\vec{r}, t) = \sum_{i=1}^n I_i \varphi_i(\vec{r}_i) f_i(t); \quad (4.2)$$

где I_i – функция эмиссии от i -го источника; $f_i(t)$ и $\varphi_i(\vec{r}_i)$ – функции, описывающие режим работы и расположение стационарных источников, соединяемых радиус-вектором (далее принято $I(\vec{r}; t) = 0$), а учёт эмиссии выполняется с помощью граничных условий).

Т.к. примесь считается пассивной, то её влиянием на плотность, вязкость воздуха, скорость воздушного потока можно пренебречь и вначале решать только «аэродинамическую» составляющую задачи, а затем «диффузионную» [13,39].

Т.к. движение воздуха происходит с дозвуковой скоростью, то его предлагается описать системой ДУ Навье-Стокса в приближении Буссинеска [39,58]:

$$\begin{cases} \rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla [\eta (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \rho_0 \vec{g} [\beta_T (T - T_0) - 1] \\ \nabla \vec{V} = 0 \end{cases}; \quad (4.3)$$

где ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³, при некой равновесной температуре T_0 , К; $\eta = \eta(T)$ – динамическая вязкость воздуха, Па·с; β_T – коэффициент термического расширения воздуха, К⁻¹.

В данном случае приближение Буссинеска применимо для учёта влияния гравитационной конвекции, т.к. отношение числа Рэлея Ra к параметру Буссинеска $\beta_T(T_0 - T)$ значительно больше единицы [48]:

$$\frac{Ra}{\beta_T(T - T_0)} \equiv \frac{\rho_0 g L^3}{\eta X} > 5,15 \cdot 10^{12} \gg 1; \quad (4.4)$$

где L – характерный линейный размер расчётной области, м; X – температуропроводность жидкости или газа, м²/сек.

Для определения турбулентной структуры потока, которая нельзя найти при численном решении системы (4.3) используется подход Дирдорфа. Он предлагает выделение масштабов Δ , где аппроксимируется турбулентность, меньше размеров сетки [87]. Подсеточное моделирование зарекомендовало себя при расчётах атмосферных процессов и явлений на расчётных областях с чрезвычайно грубыми сетками [50]. Наиболее распространённое определение [14] подсеточного масштаба

для прямоугольной ячейки размерами Δx , Δy , Δz :

– при умеренной анизотропии сетки

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}; \quad (4.5)$$

– при сильной анизотропии сетки:

$$\Delta = \max\{\Delta x; \Delta y; \Delta z\}. \quad (4.6)$$

Турбулентная структура потока, которая не может быть разрешена в явной форме при решении системы (4.3), аппроксимируется с помощью подсеточной модели турбулентности Смагоринского [2,22]. Предпочтение этой модели отдаётся из-за того, что она учитывает наличие турбулентности, образованной мелкими вихрями при обтекании ветровым потоком препятствий, но при этом вихри не надо аппроксимировать «пристеночными» функциями. Динамическая турбулентная вязкость в этой модели определяются как:

$$\begin{cases} k_x = k_y = \Delta x \Delta y k_{\text{баз}} / \Delta^2 \\ k_z = k_{\text{баз}} (\Delta z / \Delta)^2 \end{cases}; \quad (4.7)$$

где $k_{\text{баз}}$ – базовый коэффициент турбулентной вязкости, $\text{м}^2/\text{с}$, определяемый как:

$$k_{\text{баз}} = \begin{cases} k_{\phi} + \varepsilon \Delta^2 |Def| \sqrt{1 - Ri} / \sqrt{2}, & Ri < 1 \\ k_{\phi}, & Ri \geq 1 \end{cases}; \quad (4.8)$$

где $k_{\phi} = 1-15 \text{ м}^2/\text{с}$ – фоновая турбулентная вязкость; $\varepsilon = 0,1-0,4$ – константа Смагоринского; Ri – локальное число Ричардсона, определяемое как:

$$Ri = g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T}{T_{\phi}} + [\gamma_{\phi}(z) - \gamma_a] \right) / [Def]^2; \quad (4.9)$$

где $\gamma_{\phi}(z) = -dT_{\phi}/dz$ – градиент фоновой температуры; $\gamma_a = 0,01 \text{ }^{\circ}/\text{м}$ – адиабатический градиент; Def – функция диссипации или деформации:

$$Def = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right]}. \quad (4.10)$$

Т.к. $T \approx T_{\phi}$, то $Ri \approx 9,81 \frac{\partial}{\partial z} (1 + 0,01 - 0) / Def^2 \approx 0$, а система (4.8) примет вид:

$$k_{\text{баз}} \approx k_{\text{ф}} + \varepsilon \Delta^2 |Def| / \sqrt{2}. \quad (4.11)$$

Для расчёта полей скорости, давления ветра и концентрации компонентов биогаза непосредственно вблизи зданий создаётся дополнительная расчётная подобласть, в которой конечно-элементная сетка измельчается. Пример построения такой подобласти и сетки для ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» приведён на рисунке 4.1.

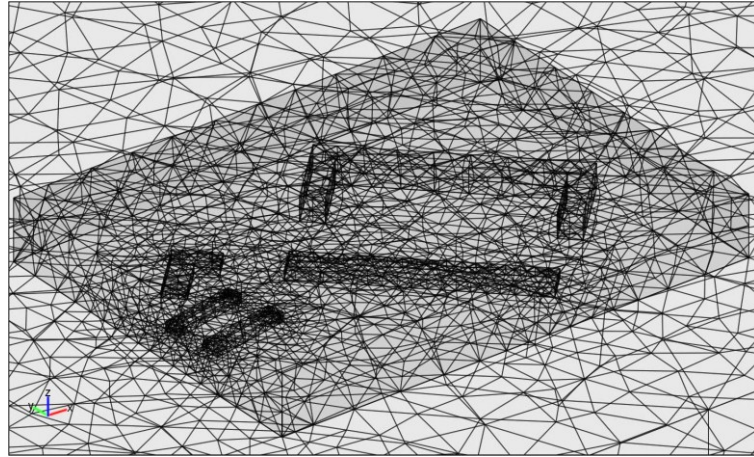


Рисунок 4.1 – Пример построения расчётной подобласти и конечно-элементной сетки для ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»

Для расчёта полей скорости и давления ветра вблизи зданий предлагается использовать модель турбулентности « k - ε »:

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla [(\eta + \eta_t)(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \vec{F} \\ \nabla \vec{V} = 0 \\ \rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla k - \nabla [(\eta + \eta_t / \sigma_k) \nabla k] = 0,5 \eta_t (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)^2 - \rho \varepsilon \\ \rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \vec{V} \nabla \varepsilon = \nabla [(\eta + \eta_t / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] = 0,5 C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_t (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)^2 - \rho C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \eta_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \end{cases} \quad ; \quad (4.12)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации турбулентности; $C_\eta = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Кинематическая турбулентная вязкость в данном случае определяется как:

$$k_{xyz} = \eta_t / \rho. \quad (4.13)$$

4.1.2 Граничные условия

На входной границе внешней подобласти задаётся тип границы «вход». Высота расчётной области принята 100 м. Ветровой поток, направленный под углом к входным границам расчётной области, задаётся системой:

$$\begin{cases} u = u^* \ln[(z - H_{cp} + z_0 / C) / z_0] \cos \alpha / \zeta \\ v = u^* \ln[(z - H_{cp} + z_0 / C) / z_0] \sin \alpha / \zeta; \\ w = 0 \end{cases} \quad (4.14)$$

где α – угол между направлением ветра на входной в расчётную область границе и осью x , рад; $\zeta = 0,4$ – константа Кармана.

Остальные граничные условия аналогичны тем, которыми задаются при типичных аэродинамических, тепловых и диффузионных расчётах [24].

На выходной границе области задаются «мягкие» граничные условия: тип границы «выход», граничное условие свободного выхода без давления.

На непроницаемых поверхностях для компонент скоростей задаётся условие «прилипания»:

$$\vec{V} = 0. \quad (4.15)$$

Если на обтекаемой поверхности находится участок, где осуществляется вход или выход воздуха с составляющими скорости u_B , v_B , w_B (не оборудованные дефлекторами газодренажные скважины и т.д.), то на участке задаётся условие «протекания»:

$$u = u_B; v = v_B; w = w_B. \quad (4.16)$$

На боковых границах расчётной области задаётся условие «симметрии»:

$$\vec{n} \cdot \vec{V} = 0; \quad \vec{\tau} \cdot [\eta(\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T - p)] = 0; \quad (4.17)$$

где $\vec{n}$ и $\vec{\tau}$ – нормальный и тангенциальный единичные векторы к граничной поверхности, вектор $\vec{n}$ направлен наружу от граничной области.

Далее приведены граничные условия для расчёта полей концентраций. Если

поверхность полигона покрыта грунтовой изоляционной засыпкой при одновременном отсутствии газодренажных скважин, то на его поверхности задаётся граничное условие для концентрации:

$$c = c_{\text{пов,возд}} \quad (4.18)$$

Если выброс биогаза осуществляется поверхностью полигона при отсутствии грунтовой изоляционной засыпки или с помощью газодренажных скважин, то задаётся граничное условие «Поток»:

$$I_i = \vec{n} \cdot (k_{xyz} \nabla c + c \vec{V}). \quad (4.19)$$

На непроницаемых для потока примеси поверхностях ($I_i = 0$) задаётся условие изоляции/симметрии:

$$\vec{n} \cdot (k_{xyz} \nabla c + c \vec{V}) = 0; \quad (4.20)$$

На остальных границах задаётся граничное условие «конвективный поток»:

$$\vec{n} \cdot (-k_{xyz} \nabla c) = 0. \quad (4.21)$$

4.1.3 Программная реализация методики расчёта в «Comsol Multiphysics» для прогнозирования загрязнения воздуха вблизи зданий

Программная реализация методики расчёта выполнена с помощью пакета «Comsol Multiphysics», использующего МКЭ. Автором настоящей работы на языке Matlab/Comsol Script™ был написан скрипт, являющийся альтернативой необходимому программному модулю. Скрипт предназначен для расчётов динамической турбулентной вязкости с использованием модели Смагоринского и параметров граничных условий. Программный код скрипта приведён в Приложении 2 и работе [97].

Для упрощения расчёта масштаба ячейки в скрипте подкоренное произведение $\Delta x \Delta y \Delta z$ в определении (4.5) можно трактовать как объём прямоугольной ячейки, равный объёму, который бы занимала кубическая ячейка с ребром Δ . На практике же наиболее популярно использование не прямоугольных, а тетраэдри-

ческих ячеек. Масштаб Δ ячейки в форме правильного тетраэдра объёмом Ω по аналогии с определением (4.5) можно найти как:

$$\Delta = \sqrt[3]{\Omega} = \sqrt[3]{a^3 \sqrt{2} / 12} = a \sqrt[3]{\sqrt{2} / 12}; \quad (4.22)$$

где a – размер ребра тетраэдрической ячейки, м.

Для расчётных областей с реальной геометрией построить изотропную сетку трудно. Поэтому по аналогии с (4.6) физически более правильно ограничиться учётом максимального размера ребра:

$$k_{xyz} = 2\sqrt[3]{9}k_{\phi} + \varepsilon a_{\max}^2 |Def| / \sqrt{2}. \quad (4.23)$$

где $a_{\max}$ – максимальный размер ребра тетраэдрической ячейки, м.

Выражение (4.23) на примере тетраэдрической сетки представляет собой некое обобщение сразу двух определений масштаба Δ . При этом отпадает необходимость расчёта подсеточного масштаба для каждой ячейки сетки.

Для программной реализации модели Смагоринского строится сетка, конечные элементы которой имеют следующие характеристики:

1. Темп роста тетраэдрического конечного элемента, отвечающий за степень сгущения сетки, принимается строго равным 1.
2. Максимальный линейный размер конечного элемента $a_{\max}$ задаётся значительно меньше размеров расчётной области для получения густой сетки с умеренной анизотропией.

Наиболее оптимальный размер конечного элемента выбран $a_{\max} = 4$ м. При такой густоте сетки при расчёте концентраций метана, выбрасываемого с полигона «Центральный» Волгограда в работах [64,95] автором экспериментально подобраны значения $\varepsilon = 0,2$ и $k_{\phi} = 4$ м²/с, при которых результаты расчётов максимально близки к экспериментальным.

Чтобы в пределах каждого конечного элемента $k_{xyz} = \text{const}$ можно использовать Лагранжевы конечные элементы с линейной аппроксимацией. Тогда внутри каждого конечного элемента производные компонентов скорости u , v и w по осям координат будут константами, тогда $Def = \text{const}$ и $k_{xyz} = \text{const}$.

Результаты расчётов полей скорости ветра, давления и концентраций компонентов биогаза над поверхностями полигонов, ПТО-1 «Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки», приведены на рисунках в Приложении 3. Для сравнения также производились расчёты по ОНД-86, результаты которых приведены в Приложении 4. Сравнение результатов приведено в таблицах 4.1-4.2.

Таблица 4.1 – Значения разовых концентраций компонентов биогаза на высоте 1,8 м над полигоном ПТО-3 «Новосёлки», полученных различными способами

Скорость и направление ветра	Вещество**	Значения концентраций компонента*, мг/м ³		
		Экспериментальное [77]	Расчётное по	
			Разработанной методике	ОНД-86
4 м/с, 5° (северо-северо-восточный)	Метан	8,7-19,3	8,34-15,62	5,10-10,12
	Углекислый газ	690-738	680-748	680-683

Примечание:

* Диапазон концентраций приведён от минимальной до максимальной

** Данные по массе выбрасываемых с полигона веществ приняты по [77]

Таблица 4.2 – Значения разовых концентраций компонентов биогаза на высоте 1,8 м над полигоном ПТО-1 «Волхонский», полученных различными способами

Скорость и направление ветра	Вещество**	Значения концентраций компонента*, мг/м ³		
		Экспериментальное [77]	Расчётное по	
			Разработанной методике	ОНД-86
4 м/с, 30° (северо-северо-восточный)	Метан	13,00-39,93	14,06-43,09	4,60-8,50
	Углекислый газ	665-820	680-813	683-691
4 м/с, 5° (северо-северо-восточный)	Метан	11,59-38,43	12,01-41,71	4,50-8,50
	Углекислый газ	680-745	673-735	683-691
	Бензол	0,03-0,04	0,031-0,043	0,003-0,006
	Ксилол (смесь изомеров)	0,002-0,07	0,0150-0,0709	0,0001-0,0074

Примечание:

* Диапазон концентраций приведён от минимальной до максимальной

** Данные по массе выбрасываемых с полигона веществ приняты по [77]

Результаты расчётов полей скорости ветра вблизи полигонов ПТО-3 «Новосёлки», «Центральный» и прилегающих к ним зданий приведены Приложении 3.

Анализ результатов в таблицах 4.1-4.2 показывает, что разработанная методика расчёта, в отличие от ОНД-86, даёт результаты, близкие к экспериментальным, что позволяет её использовать на практике для объёмных источников.

На рисунке 4.2 приведены результаты расчётов загрязнения компонентами биогаза наружного воздуха вблизи полигона «Центральный».

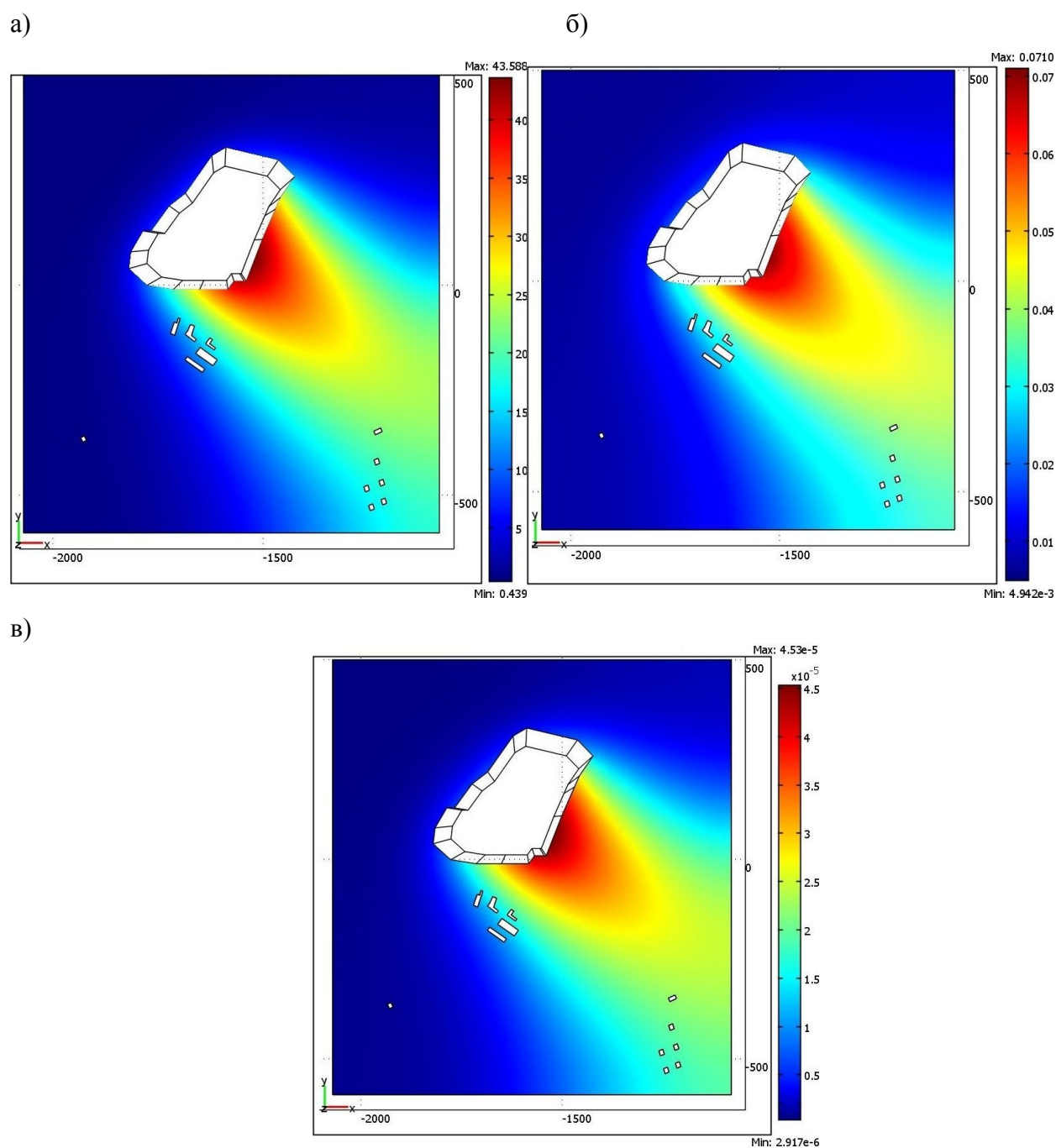


Рисунок 4.2 – Поле среднегодовых приземных концентраций, мг/м^3 , в районе полигона «Центральный»: а) метана в 2006 г.; б) аммиака в 2007 г.; в) сероводорода в 2006 г.

Для сравнения также выполнены расчёты по ОНД-86, результаты которых приведены в Приложении 3. Сравнение результатов приведено в таблицах 4.3-4.4.

Таблица 4.3 – Значения среднегодовых приземных концентраций компонентов биогаза в районе полигона «Центральный», полученных различными способами

Компонент, контрольная точка, год	Значения концентраций, мг/м ³		
	Экспериментальные* [11]	Расчётное	
		Разработанная методика	ОНД-86
Метан, здания АХЗ в 10 м от полигона	57,8-86,6	46,9	5,6
Метан, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный	17,0-25,4	27,6	17,7
Метан, центр пос. Овражный	18,0-27,0	24,8	23,7
Сероводород, здания АХЗ в 10 м от полигона	0,003-0,005	0,005	0,001
Сероводород, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный	0,003-0,005	0,005	0,003
Сероводород, центр пос. Овражный	0,0049-0,0081	0,005	0,005
Аммиак, здания АХЗ в 10 м от полигона	0,11-0,19	0,02	0,22
Аммиак, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный	0,11-0,19	0,14	0,61
Аммиак, центр пос. Овражный	0,13-0,23	0,13	0,79

* Диапазон концентраций приведён от минимальной до максимальной

На рисунке 4.3 приведены результаты расчётов загрязнения компонентами биогаза наружного воздуха вблизи полигона ПТО-3 «Новосёлки».

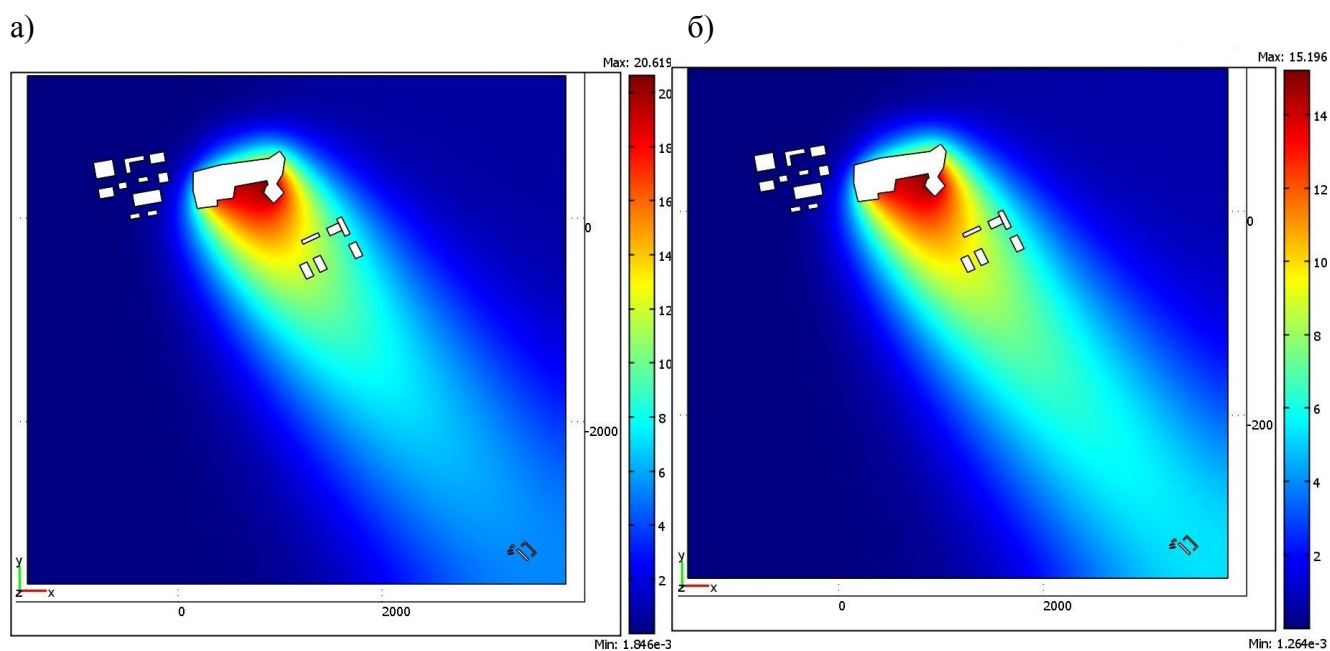


Рисунок 4.3 – Поле приземных концентраций, мг/м³, в районе полигона ПТО-3 «Новосёлки»

11.03.14: а) аммиака; б) бензола

Таблица 4.4 – Значения разовых приземных концентраций компонентов биогаза в районе полигона ПТО-3 «Новосёлки», мг/м³, полученных различными способами

Вещество	Место расположения контрольной точки					
	Граница СЗЗ полигона, складские здания завода «Nissan»			Вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»		
	Экспериментальные*	Расчётные		Экспериментальные*	Расчётные	
		Разработанная методика	ОНД-86		Разработанная методика	ОНД-86
Аммиак	12,3	15,0	19,9	4,9	6,9	6,1
Бензол	11,9	14,2	22,0	5,0	6,8	6,2

* Получено с погрешностью 25%

Анализируя результаты в таблицах 4.3 и 4.4, можно прийти к выводу, что по мере приближения к полигону ТБО и ПО разработанная методика также даёт результаты более близкие к экспериментальным, чем ОНД-86.

4.1.4 Применение методики для определения ПДВ, коэффициентов разбавления компонентов биогаза, размеров СЗЗ полигонов ТБО и ПО

В таблице 4.5 в качестве примера приведены результаты расчётов концентраций, ПДВ и коэффициентов метеорологического разбавления для аммиака и бензола на полигоне ПТО-3 «Новосёлки» для 2014 г. в зависимости от различных расстояний до полигона и подобран оптимальный размер СЗЗ.

Таблица 4.5 – Расчётные ПДВ и коэффициенты метеорологического разбавления, размеры СЗЗ полигона ПТО-3 в 2014 г. в условиях прилегающей застройки

Расстояние от полигона	Показатель	Вещество	
		Аммиак*	Бензол**
500 м (вблизи складских зданий завода «Nissan»)	Доли ПДК _{ср.сут}	375,20	142,11
	ПДВ, т/год	34,72	138,84
	$K_{разб}$, м ³ /с	$8,55 \cdot 10^4$	$8,18 \cdot 10^4$
3 км (граница минимально допустимой СЗЗ полигона ПО)	Доли ПДК _{ср.сут}	212,53	83,11
	ПДВ, т/год	61,29	237,41
	$K_{разб}$, м ³ /с	$1,49 \cdot 10^5$	$1,38 \cdot 10^5$
5,06 км (вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»)	Доли ПДК _{ср.сут}	170,1	67,84
	ПДВ, т/год	76,58	290,84
	$K_{разб}$, м ³ /с	$1,88 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^5$

* ПДК среднесуточная аммиака 0,04 мг/м³; ** ПДК среднесуточная бензола 0,1 мг/м³

Выдержать требуемый размер СЗЗ полигона, расположенного вблизи жилой застройки практически невозможно. Можно ограничиться размером СЗЗ 5,06 км и соответствующими для такого расстояния ПДВ компонентов биогаза.

4.1.5 Программная реализация методики расчёта в «Comsol Multiphysics» для прогнозирования загрязнения воздуха в застройке

На рисунке 4.4 в качестве примера приведены результаты расчётов полей скорости, динамического давления ветра, концентраций аммиака и бензола вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице».

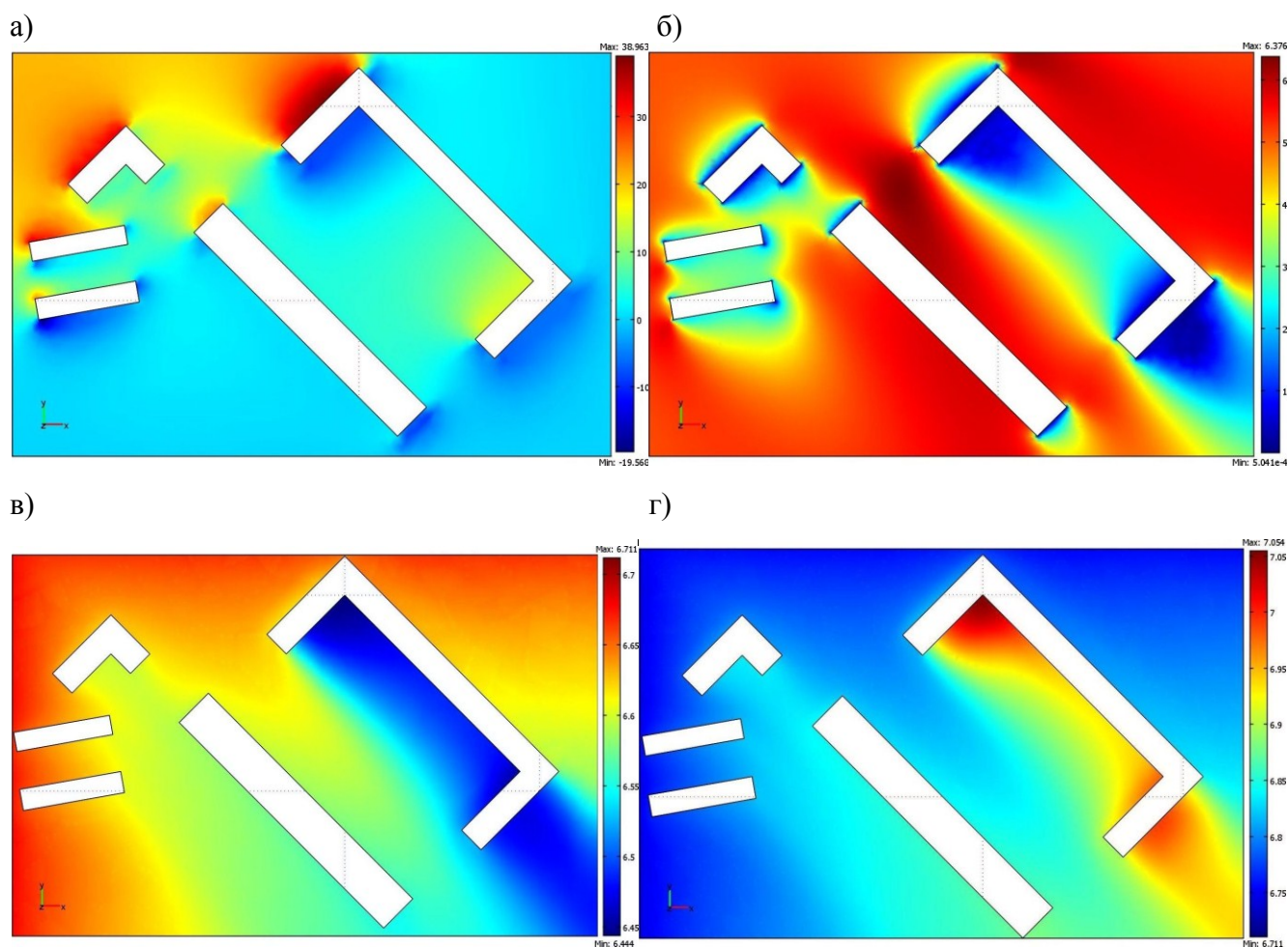


Рисунок 4.4 – Поля вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» 11.03.14: а) давления ветра, Па; б) скорости ветра, м/с; в) приземных концентраций аммиака, мг/м^3 ; г) приземных концентраций бензола, мг/м^3

Анализируя результаты аэродинамических расчётов, приведенных на рисунках 4.4 а, б, можно заключить, что при направлениях ветра (скорость ветра 5,1 м/с) вдоль протяженной стороны П-образного жилого здания у наветренного фасада значение динамического давления – 39 Па. Вблизи заветренного фасада наблюдается разряжение. В углах дворового фасада образуются циркуляционные зоны с пониженным давлением и малыми скоростями потока. Наибольшее количество загрязненного воздуха будет поступать в жилые помещения через неплотности ОК наветренных фасадов.

Анализ полей концентраций, приведенных на рисунках 4.4 в, г показал, что бензол – один из наиболее тяжёлых компонентов биогаза, скапливается в циркуляционных зонах (в углах дворового фасада). С аммиаком ситуация иная. Наибольшее загрязнение аммиаком наблюдается с наветренных сторон зданий. С подветренных сторон в циркуляционных зонах аммиак практически не скапливается, т.к. он легче воздуха.

4.2 Расчёт загрязнения внутреннего воздуха зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО

4.2.1 Система исходных уравнений

Для расчёта концентраций примеси и скорости движения воздуха в помещении используются ДУ диффузии (4.1) и Навье-Стокса (4.3), приведённые выше.

Для внутренней среды, предлагается использовать упрощённую алгебраическую модель турбулентности, решая систему ДУ Навье-Стокса без осреднения по Рейнольдсу. Кинематическая турбулентная вязкость принимается $k_{xyz} = 1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Для расчёта поля температур в помещении система уравнений методики дополняется ДУ теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) + \rho C_p \vec{V} \nabla T = Q_{heat}; \quad (4.24)$$

где $C_p = C_p(T)$ – изобарная теплоёмкость воздуха, Дж/(кг·К); $\lambda = \lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); Q_{heat} – источник или сток теплоты, Вт/м³.

4.2.2 Граничные условия

На поверхностях радиатора задаётся граничное условие температуры:

$$T = T_0. \quad (4.25)$$

На наружной поверхности стен здания задаётся условие конвективного и радиационного теплового потока:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \alpha_n (T_{\text{inf}} - T) + \varepsilon \sigma (T_{\text{inf}}^4 - T^4); \quad (4.26)$$

где T_{inf} – температура наружного воздуха, К, $T_{\text{inf}} = T_{\text{ф}}$; ε – степень черноты поверхности; $\sigma = 5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ Дж} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}^{-2} / \text{К}^4$ – константа Стефана-Больцмана.

Учёт радиационного теплообмена между внутренними поверхностями стен и радиатором осуществляется с помощью граничного условия:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = \varepsilon \left(\frac{J_0 - \varepsilon \sigma T^4}{1 - \varepsilon} - \sigma T^4 \right); \quad (4.27)$$

где J_0 – удельное теплоизлучение поверхностью тела, Вт/м².

На выходной границе, где не осуществляется теплообмен, задаётся условие изоляции/симметрии:

$$-\vec{n} \cdot (-\lambda \nabla T) = 0. \quad (4.28)$$

Эмиссию примеси, проникающей в помещение за счёт воздухопроницаемости ОК, можно определить как:

$$I_i = \Psi c_{\text{присг}} \Delta p / (\rho_n R_u); \quad (4.29)$$

где $c_{\text{присг}}$ – «пристеночная» разовая концентрация примеси снаружи здания, мг/м³.

При расчёте загрязнении воздуха в помещении, проникающего за счёт воздухопроницаемости ОК, имеет смысл учитывать только воздухопроницаемость оконного блока, которая много больше, чем воздухопроницаемость стен и панельных стыков.

Для компонент скорости движения воздуха на входной границе расчётной области задаётся начальное условие:

$$V_i = \Delta p / \rho_n R_u. \quad (4.30)$$

Если приток воздуха происходит через окно или вентиляционный клапан, то

задаётся граничное условие концентрации примеси:

$$c = \Psi c_{\text{прист.}} \quad (4.31)$$

На поверхностях стен также для скорости ставится условие «прилипания» (4.15), а для концентрации «изоляция/симметрия» (4.20).

4.2.3 Программная реализация методики в «Comsol Multiphysics» для прогноза загрязнения воздуха зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО

Программная реализация методики расчёта выполнена для жилых помещений, расположенных на 1-ом этаже многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице». Сопротивление теплопередаче наружных стен принято $R_c = 3,14 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, оконного блока $R_{\text{ок}} = 0,52 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$ [72]. Теплообмен с соседними помещениями не учитывается. Радиатор рассматривается как прямоугольный параллелепипед длиной 1,3 м, шириной 0,15 м, высотой 0,5 м. Расчёт также выполнен при наиболее неблагоприятном – северо-западном направлении ветра со скоростью 5,1 м/с. Расположения окон исследуемых комнат отмечены точками 1 и 2 на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5 – Схема расположения окон исследуемых комнат многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»: 1 – окно выходит в сторону полигона; 2 – окно выходит в сторону, противоположную полигону

На рисунке 4.6 в качестве примера приведено построение конечно-элементной сетки в комнатах №1 и №2.

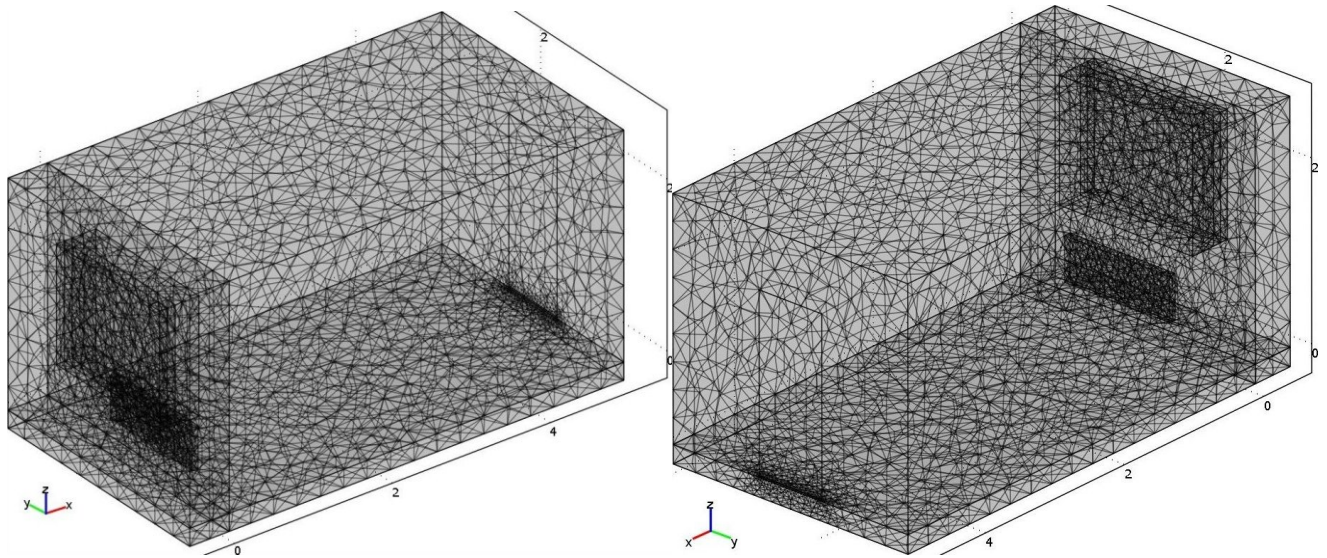


Рисунок 4.6 – Конечно-элементная сетка комнат №1 и №2 ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»

Квартиры на 1-ом этаже являются наиболее неблагоприятными, так как через ОК поступает большее количество воздуха вследствие воздухопроницаемости. Из рисунка 4.7 видно, что «пристеночные» концентрации компонентов биогаза практически не меняются по высоте здания. Следовательно, при расчете загрязнения внутреннего воздуха профиль концентрации в наружном воздухе можно не учитывать.

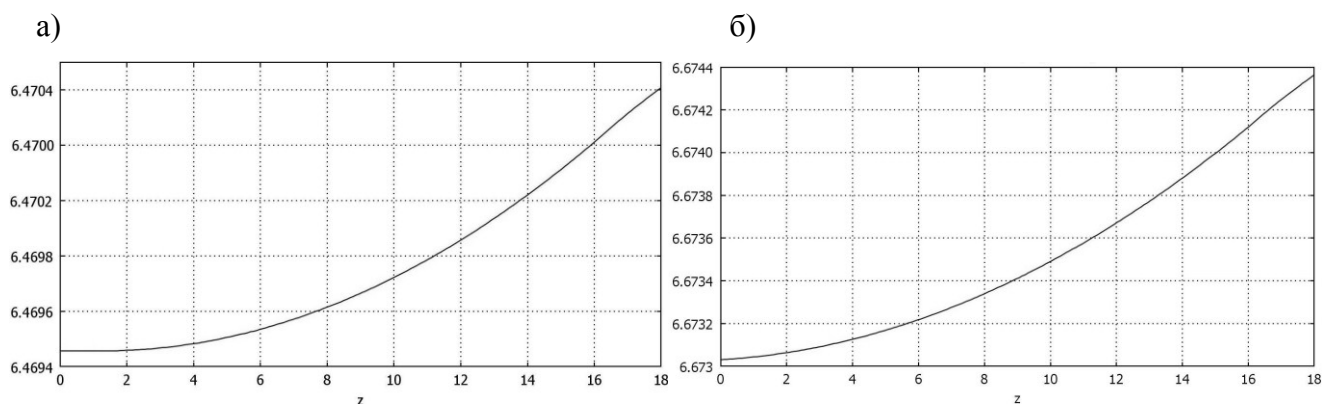


Рисунок 4.7 – Профиль разовых «пристеночных» концентраций, мг/м^3 , 11.03.14 по высоте здания: а) аммиака в районе точки 1; б) бензола в районе точки 2

Результаты расчётов полей среднесуточных концентраций аммиака и бензола приведены на рисунках 4.8-4.9 (результаты расчётов полей скорости движения и температуры воздуха приведены в Приложении 5). Кратность воздухообмена естественной вентиляции за счет воздухопроницаемости – 0.23 ч^{-1} для наветренного фасада и 0.12 ч^{-1} для заветренного фасада.

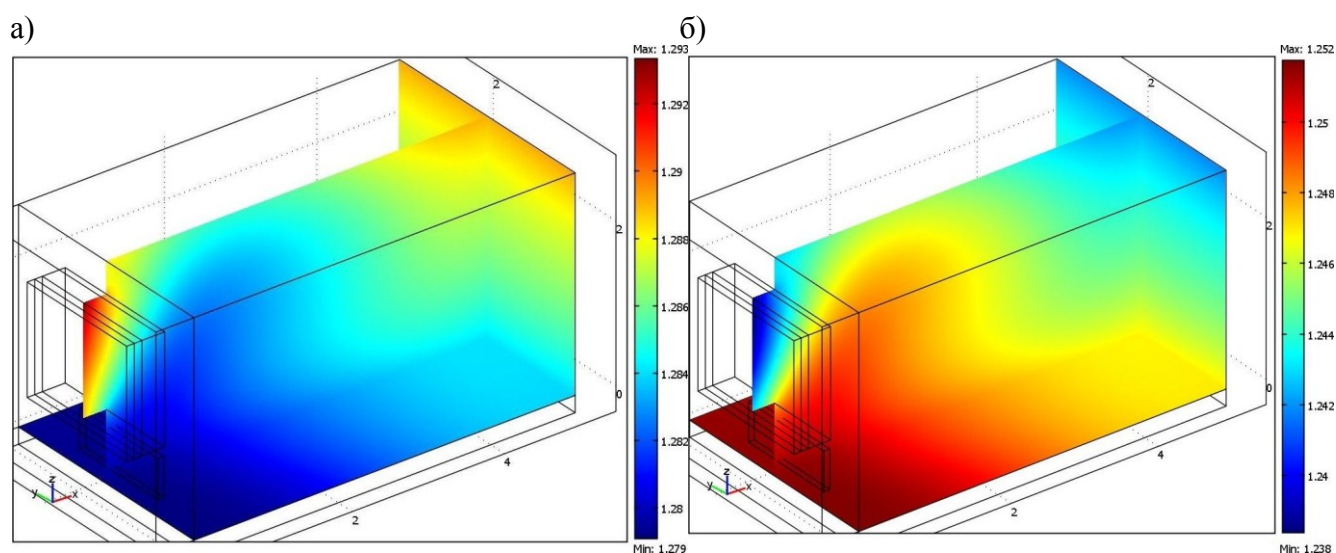


Рисунок 4.8 – Поле среднесуточных концентраций, мг/м^3 , в комнате №1 (кратность воздухообмена $0,23 \text{ ч}^{-1}$): а) аммиака; б) бензола

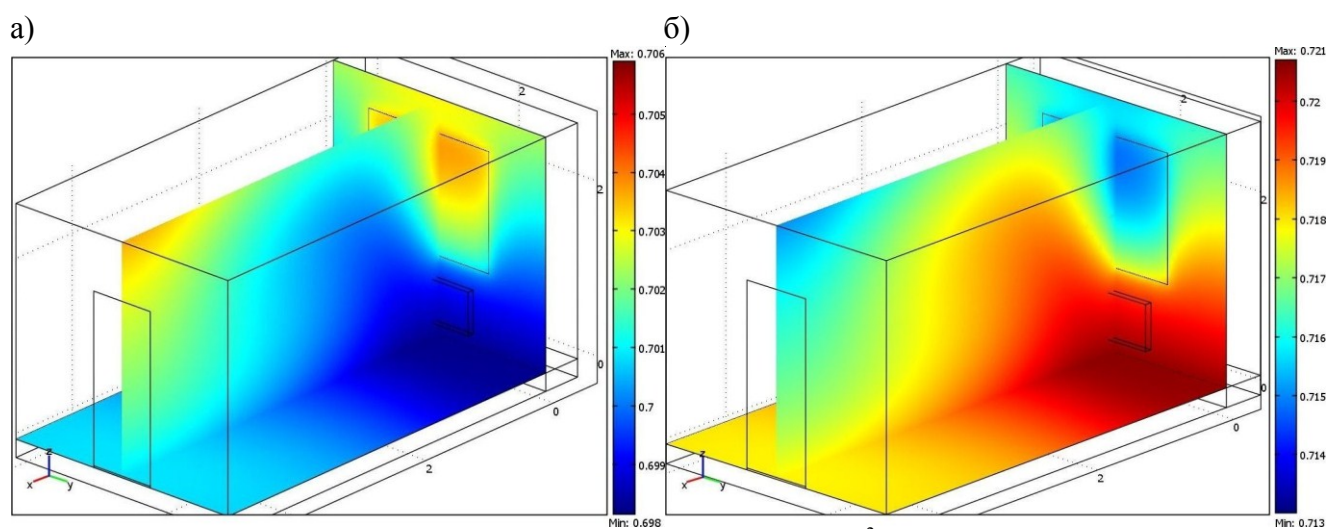


Рисунок 4.9 – Поле среднесуточных концентраций, мг/м^3 , в комнате №2 (кратность воздухообмена $0,12 \text{ ч}^{-1}$): а) аммиака; б) бензола

В таблице 4.6 приведено сравнение значений среднесуточных концентраций в комнате 1, полученных в результате расчётов и эксперимента.

Таблица 4.6 – Значения среднесуточных концентраций аммиака и бензола в центре комнаты №1 в многоквартирном доме ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»

Вещество	Значения концентраций, мг/м ³	
	Расчётные	Экспериментальные
Аммиак	1,3	1,3±0,3
Бензол	1,2	1,0±0,3

Для сравнения также выполнен перерасчёт при противоположном – юго-восточном направлении при скорости ветра 5,1 м/с. Сравнение результатов расчётов приведено в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Сравнение результатов расчётов загрязнения воздуха в комнатах №1 и №2 при различных направлениях ветра

Контрольная точка	Концентрация при наиболее неблагоприятном северо-западном направлении ветра, доли ПДК _{ср.сут}		Концентрация при юго-восточном направлении ветра, доли ПДК _{ср.сут}	
	Аммиака	Бензола	Аммиака	Бензола
В центре комнаты №1	32,10	12,47	0,54	0,20
В центре комнаты №2	17,51	7,19	0,59	0,28

Анализируя данные таблицы 4.7, можно прийти к выводу, что при юго-восточном направлении загрязнение незначительно превышает фоновый уровень. При неблагоприятном – северо-западном направлении ветра, в помещениях наблюдается многократные превышения ПДК_{ср.сут}. У людей, проживающих в данных комнатах будет проявляется «синдром больного здания» в виде заболеваний, вызываемых загрязнением воздуха биогазом. Однако концентрации загрязнений ниже порогов чувствительности запаха в воздухе людьми, которые составляют для аммиака 55 ПДК_{ср.сут}, а для бензола 50 ПДК_{ср.сут}. Т.е. негативное влияние на здоровье людей будет носить скрытый, трудно выявляемый характер.

Практический интерес представляет также время, в течение которого в помещениях будут сохраняться повышенные концентрации вредных веществ. На рисунке 4.10 приведены графики зависимости от времени концентраций аммиака и бензола в центре комнаты 1 при смене направления ветра с юго-восточного на

северо-западное. На графиках видно, что процесс достигает стационарности примерно за 16000 с. (4,4 часа). Т.е. наиболее неблагоприятному направлению ветра достаточно преобладать в течение суток 4,4 часа, чтобы концентрации аммиака и бензола в комнате достигли среднесуточного максимума.

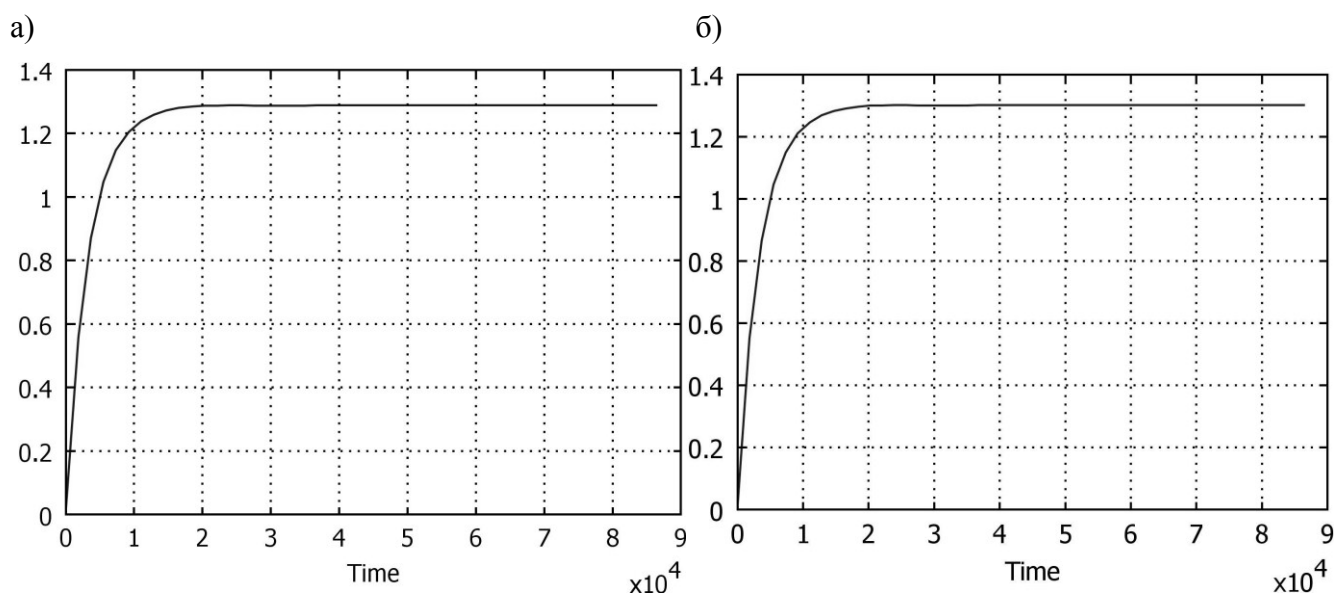


Рисунок 4.10 – график зависимости концентрации, мг/м^3 , от времени, сек., в центре комнаты 1 при смене направления ветра с юго-восточного на северо-западное в течение суток: а) аммиака; б) бензола

При преобладании неблагоприятного направления ветра практически сразу прогнозируется превышение среднесуточных ПДК аммиака и бензола. Возникает необходимость в проведении мероприятий по снижению загрязнения в подобных помещениях.

4.2.4 Методика расчёта загрязнения воздуха биогазом вблизи и внутри зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО

Разработанная методика направлена на прогнозирование и снижение загрязнения воздуха в зонах влияния полигонов ТБО и ПО. Применение данной методики позволяет также оценить качество воздуха в административных и жилых зданиях. Реализация методики представлена в виде алгоритма действий:

1. Расчёт эмиссии компонентов биогаза по предложенным зависимостям с учётом условий эксплуатации полигона и условий разложения отходов.
2. Определение граничных условий, характеризующих действие полигона ТБО и ПО как источника: концентрация компонента биогаза на поверхности полигона при наличии грунтовой изоляционной засыпки, дебет газодренажных скважин, эмиссии компонента биогаза с участка полигона ТБО и ПО.
3. Расчёт полей скорости, динамического давления ветра в зоне влияния полигона ТБО и ПО.
4. Расчёт полей разовых концентраций компонентов биогаза в воздухе в зоне влияния полигона ТБО и ПО.
5. Расчёт полей скорости, динамического давления ветра с учётом прилегающей застройки.
6. Расчёт полей разовых концентраций компонентов биогаза в воздухе застройки.
7. Расчёт среднесуточного количества примеси, поступающей в здание с приточным воздухом.
8. Расчёт поля температур (в отапливаемый период), скоростей движения воздуха в помещении.
9. Расчёт среднесуточных концентраций компонентов биогаза в помещении.
10. Оценка времени пребывания компонентов биогаза в воздухе помещений в зависимости от направления ветра.

В случае выявления загрязнения воздуха биогазом в количествах превышающих допустимые значения необходимо выполнение соответствующих мероприятий по его снижению. Более подробно о снижении загрязнения воздуха биогазом рассмотрено в следующей главе.

Выводы к главе 4

1. Разработана и программно реализована в среде «Comsol Multiphysics»

методика расчёта загрязнения биогазом воздуха вблизи и внутри зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО.

2. Предложенная методика на расстояниях менее 500 м от полигонов даёт результаты более близкие к экспериментальным, чем при расчете по ОНД-86.

3. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчётов по разработанной методике с результатами замеров и в ряде случаев расчётов по методике ОНД-86 для наружного воздуха.

4. Получено удовлетворительное совпадение результатов расчётов и замеров для воздуха внутри здания.

Для снижения выброса в атмосферу и повышения качества биогаза как топлива была усовершенствована классическая система его сбора и очистки [79,99], приведённая в обзорной главе, была усовершенствована автором настоящей работы. Усовершенствованная система приведена на рисунке 5.1 и опубликована автором в работах [65,96].



Биогаз из газодренажных скважин при открытых вентилях 1 поступает в коллектор 2, откуда посредством компрессора 4 подаётся в центробежный сепаратор 5 для удаления влаги и пыли. Степень очистки с применением центробежной сепарации по результатам исследований в лаборатории ОАО «ПМЗ «Плава»» со-

ставляет до 99,9%. В целях обеспечения взрывопожарной безопасности при подаче газа вблизи сепаратора участки газопровода оснащаются термозапорными клапанами 3 и 6. Далее биогаз поступает в узел очистки от углекислого газа и сероводорода 7 (его принципиальная схема приведена на рисунке 1.10). Углекислый газ выбрасывается в атмосферу, а сероводород поглощается фильтром с оксидом железа (III). От галогенсодержащих углеводородов, остатков аммиака и прочих примесей газ очищается в фильтре 8, заполненном цеолитами ($\text{Me}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$), степень очистки которого 98%. Очищенный биогаз одорируется этилмеркаптаном (CH_3SH) с помощью установки 9, затем посредством компрессора 10 сжижается и подаётся в газгольдер 12, где сжижается и после снижения давления газовым редуктором подаётся в блочно-модульную котельную 16 или на заправку газовых баллонов 15. В целях обеспечения взрывопожарной безопасности участки газопровода перед газгольдером и за ним также оснащаются термозапорными клапанами 11 и 13. Данная система является полуавтоматизированной и не требует постоянного вмешательства обслуживающего персонала, а большинство её элементов могут быть расположены в зданиях АХЗ полигонов ТБО и ПО. Водно-пылевая смесь, продукты взаимодействия подлежат захоронению на полигоне или переработке.

Средняя степень очистки биогаза от влаги, пыли и других примесей составляет около 98,76%, высшее число Воббе 47,9 МДж/м³, т.е. очищенный биогаз соответствует требованиям, предъявляемым к природному газу.

На рисунке 5.2 в качестве примера приведена предпроектная схема сбора и утилизации биогаза на полигоне «Центральный».

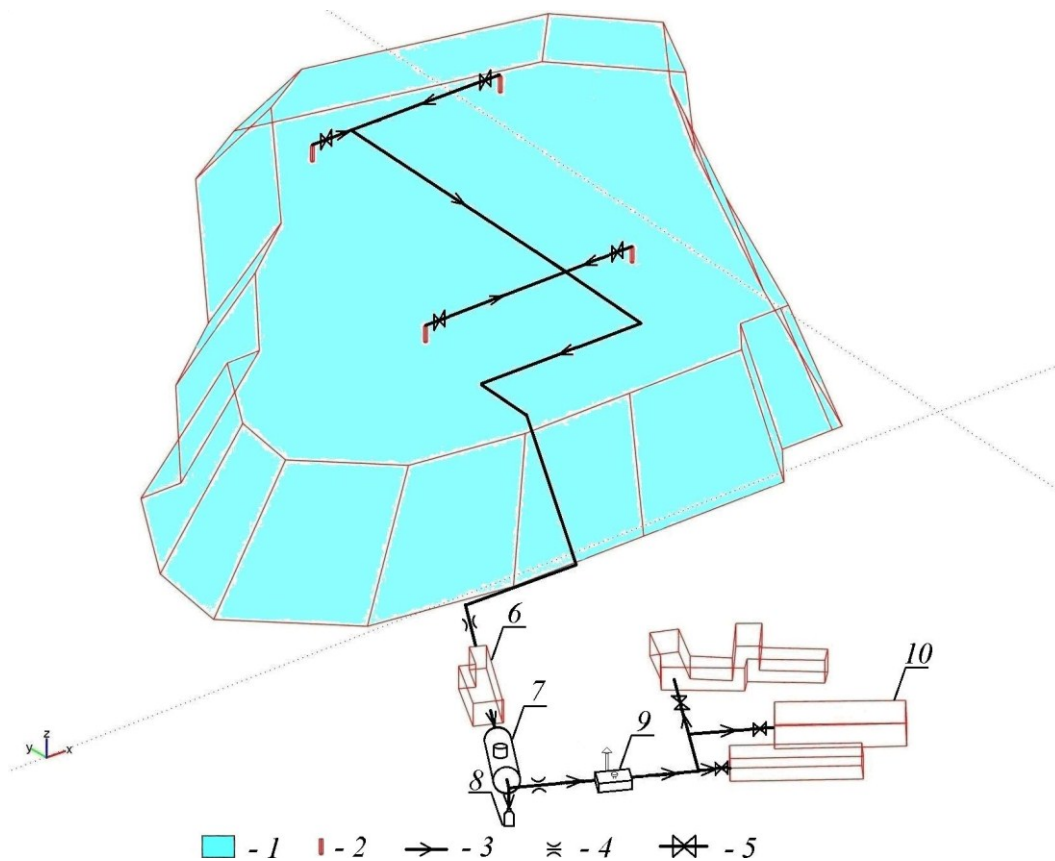


Рисунок 5.2 – Предпроектная схема сбора и утилизации биогаза на полигоне «Центральный»: 1 – термоэластомеровая плёнка; 2 – газодренажная скважина; 3 – трубопровод; 4 – термозапорный клапан; 5 – вентиль; 6 – здание, оборудованное узлами очистки и одорации биогаза; 7 – газгольдер; 8 – заправка газовых баллонов; 9 – блочно-модульная котельная; 10 – здания

По формулам (3.2)-(3.3) выполнен расчёт площади сечений, количества и дебета газодренажных скважин полигона «Центральный». Суммарная площадь сечения скважин, рассчитанная, составит $S_{\text{скв}} = 3,273 \text{ м}^2$. Предлагается установить 4 скважины $\varnothing 108$ высотой 1 м.

Вся поверхность полигона покрывается термоэластомерной плёнкой 1, имеющей высокую механическую прочность, износостойкость, сопротивляемость воздействию масел, растворителей, погодных и климатических условий. Поскольку метаногенез на полигоне происходит ограниченное количество лет, то система должна быть максимально компактной, чтобы ее демонтаж при необходимости был произведен относительно быстро. Компрессоры, установки очистки и одорации биогаза располагаются в здании 6, удаление углекислого газа из которого выполняется с помощью вытяжной вентиляции. Избытки биогаза для последующего

использования целесообразно поставлять в баллонах 8, т.к. прокладывание газопроводов за границей АХЗ полигона влечёт за собой дополнительные трудности, связанные с проведением строительных работ.

За счёт сбора и очистки биогаза концентрации большинства загрязняющих веществ (кроме углекислого газа), содержащихся в биогазе, снижаются до фоновых уровня. В таблице 5.1 в качестве примера приведены значения приземных концентраций ряда веществ, которые содержались бы в наружном воздухе вблизи полигона «Центральный», начиная с тёплого периода 2006 г. в случае внедрения и невнедрения сбора и очистки биогаза.

Таблица 5.1 – Прогнозируемые приземные концентрации веществ в наружном воздухе вблизи полигона «Центральный»

Вещество, контрольная точка, год	Концентрация вещества, доли ПДК _{ср.сут} (ОБУВ)*	
	При наличии системы сбора биогаза	Без системы сбора биогаза
Метан, СЗЗ, 10 м от полигона, 2007	0,003	46,9
Метан, СЗЗ, 50 м до полигона, 2007	0,003	27,6
Метан, центр пос. Овражный, 2007	0,003	24,8
Сероводород, СЗЗ, 10 м от полигона, 2006	0,002	0,005
Сероводород, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный, 2006	0,002	0,005
Сероводород, центр пос. Овражный, 2006	0,002	0,005
Аммиак, СЗЗ, 10 м от полигона, 2006	0,063	0,02
Аммиак, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный, 2006	0,063	0,14
Аммиак, центр пос. Овражный, 2006	0,063	0,13

* ОБУВ метана составляет 50 мг/м³, ПДК среднесуточная аммиака составляет 0,04 мг/м³, сероводорода – 0,008 мг/м³

5.2 Энергоэкономическая эффективность предложенной системы

В таблице 5.2 приведены результаты расчётов ежегодной экономии в эквиваленте тыс. м³ природного газа и в денежном выражении в период с 2006 г. по 2071 г. при использовании биогаза с полигона «Центральный» для газоснабжения.

Таблица 5.2 – Ежегодная экономия, достигаемая при использовании биогаза с полигона «Центральный» для газоснабжения

Год	Эквивалент природного газа, тыс. м ³ /год	Тариф, тыс. руб./ тыс. м ³	Экономия, тыс. руб./год	Год	Эквивалент природного газа, тыс. м ³ /год	Тариф, тыс. руб./ тыс. м	Экономия, тыс. руб./год
2006	11862,6	1,26	14947	2029	5455,68	5,29	28841
2007	12244,8	1,45	17755	2030	5241,76	5,29	27711
2008	12637,3	1,74	21989	2031	5036,22	5,29	26624
2009	12141,8	1,95	23662	2032	4838,75	5,29	25580
2010	11665,7	2,40	27998	2033	4649,02	5,29	24577
2011	11208,3	2,64	29590	2034	4466,73	5,29	23613
2012	10768,8	3,55	38229	2035	4291,59	5,29	22688
2013	10346,6	4,08	42240	2036	4123,31	5,29	21798
2014	9940,89	4,49	44642	2037	3961,63	5,29	20943
2015	9551,1	4,89	46752	2038	3806,3	5,29	20122
2016	9176,6	5,29	48512	2039	3657,05	5,29	19333
2017	8816,78	5,29	46610	2040	3513,65	5,29	18575
2018	8471,07	5,29	44782	2041	3375,9	5,29	17847
2019	8138,91	5,29	43026	2042	3243,5	5,29	17147
2020	7819,78	5,29	41339	2043	3116,3	5,29	16475
2021	7513,16	5,29	39718	2044	2994,1	5,29	15829
2022	7218,57	5,29	38161	2045	2876,7	5,29	15208
2023	6935,52	5,29	36665	2046	2763,9	5,29	14612
2024	6663,58	5,29	35227	2047	2655,6	5,29	14039
2025	6402,3	5,29	33846	2048	2551,4	5,29	13488
2026	6151,26	5,29	32519	2049	2451,4	5,29	12959
2027	5910,06	5,29	31244	2050	2355,3	5,29	12451
2028	5678,33	5,29	30019	2051	2262,9	5,29	11963

Экономия, достигаемая за счёт снижения платы за загрязнение атмосферного воздуха в пределах установленных лимитов, $\Pi_{\text{н}}^{\text{атм}}$, определяется как [28]:

$$\begin{cases} \Pi_{\text{н}}^{\text{атм}} = k_{\text{ind}} \sum_{l=1}^N H_{\text{бн}l}^{\text{атм}} k_{\text{э}}^{\text{атм}} M_l^{\text{атм}}, M_l^{\text{атм}} \leq M_{\text{н}l}^{\text{атм}} \\ \Pi_{\text{н}}^{\text{атм}} = k_{\text{ind}} \sum_{l=1}^N H_{\text{л}l}^{\text{атм}} k_{\text{э}}^{\text{атм}} (M_l^{\text{атм}} - M_{\text{н}l}^{\text{атм}}); M_{\text{н}l}^{\text{атм}} < M_l^{\text{атм}} \leq M_{\text{н}l}^{\text{л}} \end{cases}; \quad (5.1)$$

где k_{ind} – коэффициент индексации; $H_{\text{бн}l}^{\text{атм}}$ – базовый норматив платы за выброс 1 т l -го загрязняющего вещества (ЗВ) в размерах, не превышающих предельно допу-

стимый (ПДВ), руб.; $k_9^{\text{атм}}$ – коэффициент экологической ситуации и экологической значимости атмосферы в данном регионе, для воздуха в городах Поволжья $k_9^{\text{атм}} = 2,28$; $M_l^{\text{атм}}$ – фактический выброс l -го ЗВ, т; $M_{\text{н}l}^{\text{атм}}$ – ПДВ l -го ЗВ, т; $H_{\text{н}l}^{\text{атм}}$ – базовый норматив платы за выброс 1 т l -го ЗВ в пределах установленного лимита, руб.; $M_{\text{н}l}^{\text{л}}$ – выброс l -го ЗВ в пределах установленного лимита, т.

Результаты расчётов экономии, достигаемой за счёт снижения выбросов компонентов биогаза на полигоне ТБО и ПО «Центральный», при эффективности сбора биогаза 99% приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Годовая экономия, тыс. руб., достигаемая при сборе биогаза на полигоне ТБО и ПО «Центральный»

Год	Метан	Сероводород	Аммиак	Бензол	Всего
2006	1084,375	1,232	0,101	0,017	1085,726
2007	1191,856	1,355	0,104	0,019	1193,334
2008	1294,247	1,453	0,095	0,014	1295,810
2009	1356,544	1,524	0,091	0,015	1358,174
2010	1441,588	1,619	0,088	0,016	1443,311
2011	1498,903	1,684	0,084	0,017	1500,688
2012	1522,163	1,710	0,081	0,017	1523,970
2013	1567,566	1,761	0,078	0,017	1569,422
2014	1590,241	1,786	0,075	0,018	1592,120
2015	1527,887	1,717	0,072	0,017	1529,692
2016	1467,977	1,649	0,069	0,016	1469,712
2017	1410,417	1,585	0,066	0,016	1412,084
2018	1355,114	1,522	0,064	0,015	1356,714
2019	1301,979	1,463	0,061	0,014	1303,518
2020	1250,928	1,405	0,059	0,014	1252,406
2021	1201,878	1,350	0,056	0,013	1203,298
2022	1154,752	1,297	0,054	0,013	1156,116
2023	1109,473	1,246	0,052	0,012	1110,784
2024	1065,970	1,197	0,050	0,012	1067,230
2025	1024,173	1,151	0,048	0,011	1025,383
2026	984,015	1,105	0,046	0,011	985,177
2027	945,431	1,062	0,044	0,010	946,548
2028	908,360	1,020	0,043	0,010	909,433
2029	872,743	0,980	0,041	0,010	873,774
2030	838,522	0,942	0,039	0,009	839,513

Таблица 5.3 – Годовая экономия, тыс. руб., достигаемая при сборе биогаза на полигоне ТБО и ПО «Центральный» (продолжение)

Год	Метан	Сероводород	Аммиак	Бензол	Всего
2031	805,643	0,905	0,038	0,009	806,595
2032	774,053	0,869	0,036	0,009	774,968
2033	743,702	0,835	0,035	0,008	744,580
2034	714,541	0,803	0,034	0,008	715,386
2035	686,524	0,771	0,032	0,008	687,334
2036	659,605	0,741	0,031	0,007	660,384
2037	633,741	0,712	0,030	0,007	634,490
2038	608,892	0,684	0,029	0,007	609,612
2039	585,017	0,657	0,027	0,006	585,708
2040	562,078	0,631	0,026	0,006	562,742
2041	540,039	0,607	0,025	0,006	540,677
2042	518,863	0,583	0,024	0,006	519,476
2043	498,519	0,560	0,023	0,006	499,108
2044	478,971	0,538	0,023	0,005	479,538
2045	460,191	0,517	0,022	0,005	460,735
2046	442,146	0,496	0,021	0,005	442,668
2047	424,810	0,477	0,020	0,005	425,312
2048	408,153	0,458	0,019	0,005	408,635
2049	392,149	0,441	0,018	0,004	392,612
2050	376,772	0,423	0,018	0,004	377,217
2051	361,999	0,406	0,017	0,004	362,426

Приведённая экономия является минимальной, т.к. в биогазе могут содержаться прочие примеси ЗВ, снижение выброса которых даёт также экономию.

Для внедрения на полигонах ТБО и ПО системы сбора и очистки биогаза требуются капитальные вложения $K_{\text{кап}}$, определяемые как:

$$K_{\text{кап}} = K_{\text{об}} + K_{\text{нир}} + K_{\text{мон}} + K_{\text{рем}}; \quad (5.2)$$

где $K_{\text{об}}$ – затраты на необходимое оборудование, приборы, материалы; $K_{\text{нир}}$ – затраты на научно-исследовательские и проектно-конструкторские работы; $K_{\text{мон}}$ – затраты на установку и монтаж сооружения, тыс. руб.; $K_{\text{рем}}$ – затраты на ремонт оборудования в процессе эксплуатации.

Расходы, связанные с научно-исследовательскими и проектно-конструкторскими работами и монтажом определяется как 50% и 20% от стоимо-

сти оборудования соответственно, капитальный и текущий ремонт, поддержание работоспособного оборудования составляет приблизительно 30% их стоимости.

Расчет капитальных затрат на оборудование, приборы, материалы сведён в таблицу 5.4.

Таблица 5.4 – Капитальные затраты на оборудование, приборы и материалы

№ п/п	Наименование	Коли- чество	Цена единицы	Всего, тыс. руб
1	Газодренажная скважина	4	15 тыс. руб./ед.	60
2	Изоляция поверхности полигона термоэластомеровой плёнкой	57400 м ²	0,05 тыс. руб./м ²	2870
3	Термозапорный клапан	6	25 тыс. руб./ед.	150
4	Компрессор подачи биогаза	1	100 тыс. руб./ед.	100
5	Компрессор сжижения метана	1	320 тыс. руб./ед.	320
6	Центробежный сепаратор	1	500 тыс. руб./ед.	500
7	Узел отделения биогаза от углекислого газа и сероводорода с помощью моноэтаноламина	1	2500 тыс. руб./ед.	2500
8	Фильтр с оксидом железа (III)	1	200 тыс. руб./ед.	200
9	Цеолитовый фильтр	1	250 тыс. руб./ед.	200
10	Одоратор газа	1	160 тыс. руб./ед.	160
11	Газгольдер, объём 50 м ³	1	980 тыс. руб./ед.	980
12	Редуктор давления	1	2 тыс. руб./ед.	2
13	Метановая минизаправочная станция	1	300 тыс.руб./ед.	250
14	Блочно-модульная котельная, мощность 0,8 МВт	1	2800 тыс.руб./ед.	2800
15	Расходы на материалы и детали	0,63 км	8,5 тыс. руб./км	5,355
16	Монтажно-сварочные работы при прокладывании газовых труб Ø108	0,63 км	520 тыс. руб./км	327,6
17	Земляные работы для прокладки газопровода	0,63 км	270 тыс. руб./км	170,1
Цены приведены с учётом НДС			Итого, $K_{об}$:	11595,06

Затраты на монтажно-сварочные работы при прокладывании газовых труб включены в капитальные затраты на необходимое оборудование, тогда по уравнению (5.3) $K_{кап} = 11595,06 + (1 + 0,5 + 0,2 + 0,3)(11595,06 - 372,6) = 34040$ тыс. руб.

Считая, что система эксплуатируется в течение рабочей смены, т.е. 40 ч. в неделю, в течение всего тёплого периода года, расходы электроэнергии составят:

– для компрессора сжижения метана мощностью 37 кВт

$$37 \cdot 40 \cdot 248 / 7 = 52434,29 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

– для насоса подачи биогаза мощностью 19 кВт

$$19 \cdot 40 \cdot 248 / 7 = 26925,71 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

– для центробежного сепаратора мощностью 40 кВт

$$7,5 \cdot 40 \cdot 248 / 7 = 10628,57 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

– для установки очистки от сероводорода и углекислого газа мощностью 100 кВт

$$100 \cdot 40 \cdot 248 / 7 = 141714,29 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При цене тыс. руб. за 1 кВт·ч в 2006 г. годовой расход на электроэнергию $E_{\text{эл}}$ составит:

$$E_{\text{эл}} = 0,00105(52434,29 + 26925,71 + 10628,57 + 141714,29) = 243,29 \text{ тыс. руб./год}.$$

Годовые расходы на зарплату обслуживающего персонала системы $E_{\text{зарп}}$ (2 чел.) при ежемесячной зарплате 25 тыс. руб. составят:

$$E_{\text{зарп}} = 2 \cdot 25 \cdot 12 = 600 \text{ тыс. руб./год}.$$

Расход оксида железа (III) $E_{\text{окс.ж (III)}}$ составляет около 0,071 т на 1 т сероводорода, расход цеолитов $E_{\text{цеолит}}$ – примерно 0,1 т на 1 т аммиака и других примесей. Ежегодные расходы оксида железа (III) при эффективности сбора биогаза 99% в натуральном и денежном выражении приведены в таблице 4.6, а цеолитов – в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Ежегодные расходы оксида железа (III) для очистки биогаза

Год	Масса оксида железа (III), т	Цена, тыс. руб.	Год	Масса оксида железа (III), т	Цена, тыс. руб.
2006	0,135	1,185	2011	0,128	1,918
2007	0,140	1,359	2012	0,123	1,971
2008	0,144	1,575	2013	0,118	2,006
2009	0,138	1,720	2014	0,113	2,101
2010	0,133	1,836	2015	0,109	2,019

Таблица 5.5 – Ежегодные расходы оксида железа (III) для очистки биогаза (продолжение)

Год	Масса оксида железа (III), т	Цена, тыс. руб.	Год	Масса оксида железа (III), т	Цена, тыс. руб.
2016	0,105	1,939	2034	0,051	0,944
2017	0,101	1,864	2035	0,049	0,907
2018	0,097	1,790	2036	0,047	0,871
2019	0,093	1,721	2037	0,045	0,837
2020	0,089	1,653	2038	0,043	0,804
2021	0,086	1,588	2039	0,042	0,773
2022	0,082	1,525	2040	0,040	0,743
2023	0,079	1,465	2041	0,039	0,713
2024	0,076	1,408	2042	0,037	0,685
2025	0,073	1,353	2043	0,036	0,659
2026	0,070	1,300	2044	0,034	0,633
2027	0,067	1,249	2045	0,033	0,608
2028	0,065	1,200	2046	0,032	0,584
2029	0,062	1,153	2047	0,030	0,561
2030	0,060	1,108	2048	0,029	0,539
2031	0,057	1,064	2049	0,028	0,518
2032	0,055	1,023	2050	0,027	0,498
2033	0,053	0,982	2051	0,026	0,478

Таблица 5.6 – Ежегодные расходы цеолитов для очистки биогаза

Год	Масса цеолитов, т	Цена, тыс. руб.	Год	Масса цеолитов, т	Цена, тыс. руб.
2006	0,074	0,888	2022	0,045	0,856
2007	0,077	0,917	2023	0,044	0,822
2008	0,079	0,946	2024	0,042	0,790
2009	0,076	0,909	2025	0,040	0,759
2010	0,073	0,970	2026	0,039	0,729
2011	0,070	1,059	2027	0,037	0,701
2012	0,068	1,131	2028	0,036	0,673
2013	0,065	1,168	2029	0,034	0,647
2014	0,062	1,179	2030	0,033	0,622
2015	0,060	1,133	2031	0,032	0,597
2016	0,058	1,088	2032	0,030	0,574
2017	0,055	1,046	2033	0,029	0,551
2018	0,053	1,005	2034	0,028	0,530
2019	0,051	0,965	2035	0,027	0,509
2020	0,049	0,927	2036	0,026	0,489
2021	0,047	0,891	2037	0,025	0,470

Таблица 5.6 – Ежегодный расход цеолитов для очистки биогаза (продолжение)

Год	Масса цеолитов, т	Цена, тыс. руб.	Год	Масса цеолитов, т	Цена, тыс. руб.
2038	0,024	0,451	2045	0,018	0,341
2039	0,023	0,434	2046	0,017	0,328
2040	0,022	0,417	2047	0,017	0,315
2041	0,021	0,400	2048	0,016	0,303
2042	0,020	0,385	2049	0,015	0,291
2043	0,020	0,370	2050	0,015	0,279
2044	0,019	0,355	2051	0,014	0,268

Срок окупаемости определяется по графику на рисунке 5.3, на котором видно, что он составит приблизительно 2,1 года.

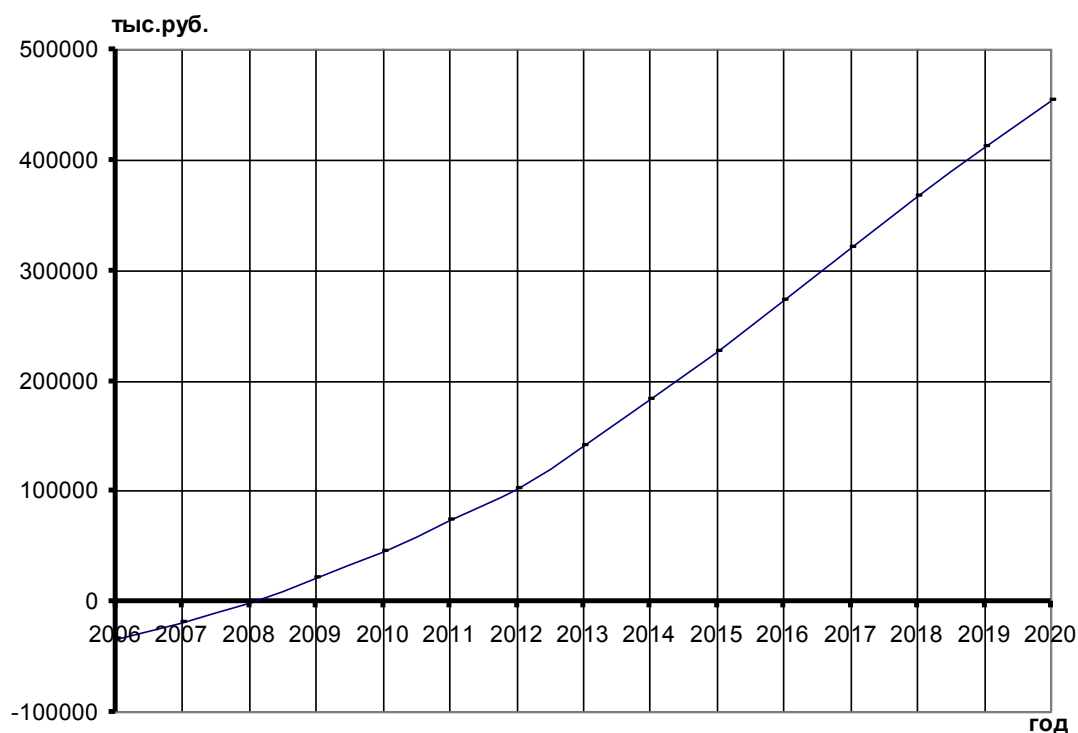


Рисунок 5.3 – График срока окупаемости затрат

Выводы к главе 5

1. Усовершенствована система сбора и очистки биогаза с полигонов ТБО и ПО, а именно:

- Предложено использование центробежной сепарации для очистки биогаза от влаги и пыли;

- Улучшена очистка биогаза от сероводорода и углекислого газа за счёт последовательной работы установки очистки с помощью раствора моноэтаноламина и фильтра поглотителя на основе оксида железа (III);
- Система дополнена цеолитовым фильтром для очистки биогаза от аммиака, галогенсодержащих углеводородов и прочих примесей.

2. Благодаря сбору биогаза улучшается состояние воздушной среды как снаружи, так и внутри зданий, расположенных около полигонов ТБО и ПО, т.к. концентрация большинства компонентов биогаза снижается до фонового уровня.

3. На примере полигона ТБО и ПО «Центральный» показано, что (использование предложенной системы сбора, очистки, сбора и снабжения с использованием биогаза имеет высокий положительный экономический эффект. Общая сметная стоимость для установки системы составляет около 25640 тыс. руб. со сроком окупаемости около 2,1 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе выполнено решение актуальной задачи—прогноза и снижения загрязнения наружной и внутренней среды зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО.

Основные выводы по работе:

1. В результате комплексного исследования полигонов ТБО и ПО как источников загрязнения воздушной среды и альтернативного топлива автором предложены зависимости:

- для расчёта эмиссии биогаза с учетом условий эксплуатации полигонов;
- газоэнергетического потенциала полигонов ТБО и ПО в эквиваленте тыс.м³ природного газа;
- экспериментально обосновано, что полигоны представляют собой объемные «холодные» источники, т.е. температура выбрасываемого в атмосферу биогаза практически равна температуре окружающей среды.

2. Выполнен аналитический обзор и обобщение существующих методик прогнозирования качества воздушной среды в зоне влияния полигонов.

3. Разработана и программно реализована в среде «Comsol Multiphysics» методика расчёта загрязнения биогазом воздуха административных и жилых зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО. Предложенная методика на расстояниях менее 500 м от полигонов даёт результаты более близкие к экспериментальным, чем принятая в РФ ОНД-86.

4. Поведены натурные исследования загрязнения биогазом воздуха на границе СЗЗ полигонов и в прилегающей жилой застройке.

5. Разработана методика расчёта загрязнения внутреннего воздуха жилых зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО, которая позволяет прогнозировать уровень загрязнения воздуха компонентами биогаза жилых помещений с учетом временного фактора в зависимости от расстояния до полигона и направления ветра.

6. Изучены способы утилизации и использования биогаза как альтернативного источника энергии.

7. Предложено усовершенствование системы удаления и обезвреживания балласта из биогаза с целью использования его в качестве альтернативного источника энергоснабжения. Доработана классическая схема очистки биогаза с полигонов ТБО и ПО. Предложено последовательно использовать метод центробежной сепарации для очистки биогаза от пыли, влаги, систему реагентов моноэтаноламина, оксида железа (III) для удаления углекислого газа, поглощения сероводорода и цеолитов для поглощения аммиака, галогенсодержащих углеводородов и других примесей. Использование системы газоснабжения с данной системой очистки имеет высокий положительный энергетический и экономический эффект.

Результаты диссертации внедрены в проектно-конструкторской деятельности ООО «Тэсла» в 2012 г. и используются при в учебном процессе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акопова, Г.С. Обеспечение экологической и промышленной безопасности при залповых выбросах загрязняющих веществ от объектов газового комплекса / Г.С.Акопова, С.В.Ганага, Н.С.Толстова / Вопросы обеспечения пожарной и промышленной безопасности. – Том 2, 2010, №1 – С. 53-60.
2. Алоян, А.Е. Динамика и кинетика газовых примесей и аэрозолей в атмосфере. Курс лекций / А.Е.Алоян / М.: ИВМ РАН, 2002. – 201 с.
3. Андрианов, К.А. / Строительная физика / К.А. Андрианов, И.В. Матвеева, А.М. Макаров. – Тамбов: изд-во ТГТУ. – 42 с.
4. Бажин, Н.М. Метан в атмосфере / Н.М.Бажин / Соросовский образовательный журнал. – 2000. – Том 6, № 2. – С. 52-57.
5. Балахчина, Т.К. Оценка воздействия свалочного газа с полигонов твёрдых бытовых отходов на человека / Т.К.Балахчина / Физиология. Медицина. Экология человека. – 2012. – Выпуск №2/2012. – С. 41-57.
6. Батракова, Г.М. Оценка применимости модели LANDGEM для прогноза эмиссии биогаза с территории захоронения отходов / Г.М.Батракова, С.В.Максимова, И.С.Глушанкова / Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-15: Сб. трудов XV Междун. науч. конф. В 10-и т. Т. 4 Секция 4 / Под общ. ред. В.С.Балакирева. – Тамбов: ТамбГТУ, 2002. – С. 89-91.
7. Батракова, Г.М. Моделирование переноса и рассеивания атмосферном воздухе метана, эмитированного с территории захоронения твёрдых бытовых отходов / Г.М.Батракова, М.Г.Бояршинов, В.Д.Горемыкин / Вестник Воронежского ун-та. Геология, 2005. – №1. – С. 256-261.
8. Берлянд, М.Е. Современные проблемы атмосферной диффузии и загрязнения атмосферы / М.Е.Берлянд. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 448 с.
9. Бичелдей, Т.К. Моделирование переноса и рассеивания компонентов биогаза в атмосферном воздухе с территорий захоронения твердых бытовых отходов / Т.К.Бичелдей / Вестник РУДН. Серия «Экология и безопасность жизнеде-

тельности», 2011. – № 1. – С. 49-52.

10. Брюханов, О.Н. Газоснабжение / О.Н.Брюханов, В.А.Жила, А.И.Плужников. – М.: Издательский центр «Академия», 2008. – 448 с.

11. Бобунова, Г.А. Эколого-гигиеническое обоснование показателей оценки безопасности эксплуатации полигонов твердых бытовых отходов (на примере Волгоградской области): дис. ... канд. биол. наук: 14.02.01 / Бобунова Гаянэ Анастасовна. – М., 2010. – 129 с.

12. Бызова, Н.Л. Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси / Н.Л.Бызова, Е.К.Гаргер, В.Н.Иванов. – Л.: Гидрометеиздат, 1991. – 287 с.

13. Венгеров, И.Р. Теплофизика шахт и рудников. Математические модели / И.Р.Венгеров. – Донецк: НОРД-ПРЕСС, 2008. – 631 с.

14. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчётах сложных течений / А.В.Гарбарук, М.Х.Стрелец, М.Л.Шур. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

15. Годовська, Т.Б. Екологічний аналіз та моделювання розсіювання забруднюючих речовин з полігону твердих побутових відходів / Т.Б.Годовська, В.В.Гузеля. – Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 5/2012 (76). – С. 115-118.

16. Гонопольский, А.М. Сравнение эколого-экономических характеристик методов утилизации свалочного газа / А.М.Гонопольский, В.Е.Мурашов, К.Я.Кушнир / Рециклинг отходов. – 2007, №3. – С. 2-8.

17. Горохов, В.Л. Концепция обращения с твёрдыми бытовыми отходами на Северо-Западе и статистические методы контроля и оценки норм образования отходов / В.Л.Горохов, А.С.Гурьев, А.О.Карелин. – СПб: МАНЭБ, 2001. – 65 с.

18. ГН 2.1.6.1338-03. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест (с изм. от 03.11.2005, 04.02.2008, 27.01.2009): утв. Главным гос. сан. врачом РФ, Первым замом Министра здравоохранения РФ 21.05.2003, введ. в действие Пост-ем Главного гос. сан. врача РФ от 30.05.2003, № 114 с 25.06.2003. – М., 2003. – 268 с.

19. ГН 2.1.6.2309-07. Ориентировочные безопасные уровни воздействия (ОБУВ) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест: утв. постановлением Главного гос. сан. врача РФ от 19.12.2007. – М., 2008. – 138 с.
20. Грунтоведение / В.Т.Трофимов [и др.]; под ред. В.Т.Трофимова. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: НАУКА, 2005. – 1024 с.
21. Гурвич, В.И. Добыча и утилизация свалочного газа – самостоятельная отрасль мировой индустрии / В.И.Гурвич, А.Б.Лифшиц. Электронный журнал «Экологические системы». – №9, сентябрь, 2006. – URL: http://esco-ecosys.narod.ru/2006_9/art_144.htm (дата обращения 22.10.2013).
22. Дацюк, Т.А. Моделирование рассеивания вентиляционных выбросов / Т.А.Дацюк. – СПб: СПбГАСУ, 2000. – 210 с.
23. Доклад об экологической ситуации в Санкт-Петербурге / под ред. Д.А.Голубева, Н.Д.Сорокина. – СПб: ООО «Сезам-принт», 2011. – 108 с.
24. Егоров, В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности. Учебное пособие / В.И.Егоров. – СПб: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
25. Замай, С.С. Модели оценки и прогноза загрязнения атмосферы промышленными выбросами в информационно-аналитической системе природоохранных служб крупного города: учеб. пособие / С.С.Замай, О.Э.Якубайлик. – Красноярск: Краснояр. гос. ун-т, 1998. – 109 с.
26. Заводская, Е.К. Аналитический обзор. Качество воздуха в городах России за десять лет. 1998-2007 гг. / Е.К.Заводская, Т.П.Ивлева, И.В.Смирнова, И.А.Воробьева. – СПб: ГУ «ГГО», Росгидромет, 2009. – 133 с.
27. Зомарев, А.М. Санитарно-гигиенический мониторинг полигонов захоронения твёрдых бытовых отходов / А.М.Зомарев. – Пермь: ПермГТУ. – Пермь, 2007. – 218 с.
28. Инструктивно-методические указания по взиманию платы за загрязнение окружающей природной среды (ред. от 15.02.2000, с изм. от 12.07.2011): утв. Минприроды РФ от 26.01.1993, зарег. в Минюсте РФ 24.03.1993 N 190.
29. Инструкция по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов для твердых бытовых отходов: АКХ им. Памфилова: утв. Минстроем

02.11.1996, согл. письмом Гос. комитета сан.-эпидемиол. контроля РФ 10.06.1996 г. № 01-8/17-11. – М.: Минстрой России, 1997. – 39 с.

30. Колобродов, В.Г. Способы повышения качества биогаза / В.Г.Колобродов, М.А.Хажмурадов, Л.В.Карнацевич, А.Санковский / ЭСКО. Электронный журнал энергосервисной компании «Экологические системы». – 2006. – №9, сентябрь. – URL: http://esco.co.ua/journal/2006_9/art_146.htm (дата обращения: 17.02.2014).

31. Малявина, Е.Г. Теплотери здания / Е.Г.Малявина. – М.: АВОК-ПРЕСС, 2007 – 144 с.

32. Мариненко, Е.Е. Тенденции развития систем сбора и обработки дренажных вод и метансодержащего газа на полигонах твёрдых бытовых отходов: отечественный и зарубежный опыт / Е.Е.Мариненко, Ю.Л.Беляева, Г.М.Комина. – СПб: Недра, 2001. – 160 с.

33. Методика расчёта количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов / М.: АКХ, 2004. – 20 с.

34. Методика расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86 РД 52.04.212-86: утв. Председателем Гос. комитета СССР по гидрометеорологии и контролю природной среды 04.08.86 № 192: согл. Госстроем СССР 07.01.86 № ДП-76-1: согл. Минздравом СССР 07.01.86 № 04-4/259-4: ввод. в действие с 01.01.87. – Ленинград: Гидрокомиздат, 1987. – 66 с.

35. Методические нормативные указания по выбору и размещению площадок временного складирования и мини-полигонов ТБО сельских населенных пунктов и поселков городского типа: утв. приказом Минприроды Республики Беларусь 19.01.2000 №14/8а. – Минск, 2000.

36. Методические указания по расчету выбросов парниковых газов в атмосферу от полигонов твердых бытовых отходов: утв. приказом Министра охраны окружающей среды Республики Казахстан от 05.11.10 / Разраб. КазахНИИ экологии и климата. – Астана, 2010. – 15 с.

37. Методические указания по расчету количественных характеристик выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от полигонов твердых бытовых и промышленных отходов: утв. АКХ им. Памфилова 01.01.1995. – М., 1995. – 9 с.
38. Мишланова, М.Ю. Термодинамическая модель техногенного массива ТБО / М.Ю.Мишланова / Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования в развитии экосистем: Междунар. науч.-практич. конференция. Материалы конференции. Ч. 1. – М., 2006. – С. 300-305.
39. Монин, А.С. Статистическая гидромеханика. Механика турбулентности. Часть 1 / А.С.Монин, А.М.Яглом. – М.: Наука, 1965. – 179 с.
40. МКДС.4061 19.000 РЭ. Микроманометр жидкостный компенсационный с микрометрическим винтом типа МКВК-250. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / ЗАО «ТПА «Промприбор Сервис»». – 18 сентября, 2008. – URL: <http://www.prompriborsrw.ru/index.php?go=Pages&in=view&id=428> (дата обращения: 13.03.2014).
41. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Вып.13, ч.1-6. – Л.: Гидрометиздат, 1990. – 724 с.
42. Обзор фонового состояния окружающей природной среды на территории стран СНГ за 2008 г. / Ю.А.Израэль [и др.]; под ред. Ю.А.Израэля. – М.: Росгидромет, 2010. – 103 с.
43. Отраслевая методика расчета приземной концентрации загрязняющих веществ, содержащихся в выбросах компрессорных станций магистральных газопроводов (Отраслевое дополнение 1 к ОНД-86): утв. РАО Газпром 04.12.1995. – М.: ИРЦ Газпром, 1996. – 49 с.
44. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С.Патанкар. – М.: ЭНЕРГОМАШИЗДАТ, 1984. – 124 с.
45. Полигоны твёрдых бытовых отходов. Основные положения проектирования: ДБН В.2.4-2-2005: утв. Гос. комитетом Украины по строит-ву и архитектуре: ввод. в действие 01.01.06 – Киев: Офиц. издатель нормативных документов в области строит-ва и промышленности строительных материалов Госстроя Украины ГП «Укрархбудинформ», 2005. – 33 с.

46. Пособие по мониторингу полигонов ТБО. Thales E&C – GKW-Consult. Проект Тасис – Совершенствование системы управления бытовыми отходами в Донецкой области Украины, 2004. – 271 с.
47. Приказ Росстата от 20.07.2009 №146 «Об утверждении указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения...». – М., 2009. – 31 с.
48. Пухначев, В.В. Микроконвекция в вертикальном слое / В.В.Пухначев / Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 1994 – №5. – С. 76-84.
49. РД 153-34.0-20.364-00. Методика инфракрасной диагностики тепло-механического оборудования: Утв. РАО ЕЭС России от 26.04.00 26.00; ввод. в действие с 01.05.00. – М.: ОРГРЭС, 2004. – 50 с.
50. Репинская, Р.П. Параметризация процессов подсеточного масштаба / Р.П. Репинская. – Л.: ЛГМИ, 1979. – 33 с.
51. Российская Федерация. Госкомстат. Об утверждении указаний по заполнению форм федерального статистического наблюдения...: Приказ Госкомстата РФ от 20.07.2009 №146 [Электронный ресурс]. URL: <http://zakonbase.ru/content/nav/139524> (дата обращения 04.02.2013).
52. Руководство по проектированию санитарно-защитных зон промышленных предприятий: разработ. ЦНИИП Градостроительства СССР. – М.: Стройиздат, 1984. – 119 с.
53. Руководство по расчёту выбросов метана в проектах Механизма чистого развития [Электронный ресурс] / Проект ПРООН: Усиление потенциала для Механизма чистого развития в Узбекистане / Компания MUFG. – Ташкент: MUFG, 2008. – Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.sc.mufg.jp/english/e_cefc/achieve/pdf/ecefc_05.pdf (дата обращения: 22.10.2013).
54. Самарский, А.А. Разностные методы решения задач газовой динамики / А.А.Самарский, Ю.П.Попов. – М.: Наука, 1992. – 424 с.
55. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1200-03. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов: сан. правила и нормы

(с изм. №1 от 10.04.08, №2 06.10.09, №3 от 09.09.10): утв. и введ. 21.09.07. – М.: Минздрав России, 2003. – 24 с.

56. **Сауц, А.В.** Граничные условия численного моделирования рассеивания биогаза над полигоном / А.В.Сауц / Инженерно-экологические системы: материалы Междунар. конгресса, посвящённого 180-летию СПбГАСУ. – СПб: СПбГАСУ, 2012. – С. 155-158.

57. **Сауц, А.В.** Математическое моделирование рассеивания выбросов в атмосфере биогаза с полигонов твёрдых бытовых отходов / А.В.Сауц, В.Л.Горохов / Актуальные проблемы современного строит-ва. 64-я Междунар. науч.-тех. конф. молодых ученых, посвящ. 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова. – СПб: СПбГАСУ, 2011. – С. 200-205.

58. **Сауц, А.В.** Моделирование процессов вентиляции [Электронный ресурс] / А.В.Сауц, Т.А.Дацюк, В.Р.Таурит, Б.Н.Юрманов / Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2012. – №5. URL: <http://www.science-education.ru/105-6744> (дата обращения: 22.10.2013).

59. **Сауц А.В.** Об энергетическом обследовании возобновляемых источников энергии. Тепловизионное обследование полигонов ТБО и ПО [Электронный ресурс] / А.В.Сауц / Технологии энергосбережения. Статьи экспертов. – 2013. URL: <http://spbtес.ru/expert/ob-energeticheskom-obsledovanii-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-teplovizionnoe> (дата обращения: 22.10.2013).

60. **Сауц, А.В.** Обоснование санитарно-защитных зон полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов при их строительстве и эксплуатации / А.В. Сауц / Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 4(33) – С. 200-202.

61. **Сауц, А.В.** Переработка твёрдых бытовых отходов как фактор развития автомобилей на сжатом газе. Уравнение эмиссии метана / А.В.Сауц, В.Л.Горохов, А.Г.Семёнов / Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками: материалы 75-й Междунар. науч.-тех. конф. Ассоциации автомобильных инженеров. – Тольятти: ОАО «АВТОВАЗ», 2011. – С. 255-258.

62. **Сауц, А.В.** Переработка твёрдых бытовых отходов. Уточнение урав-

нения эмиссии метана / А.В.Сауц, В.Л.Горохов, А.Г.Семёнов / Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Материалы I Всерос. Науч.-тех. конференции 22-25 ноября 2011 г. / Рубцовск: Рубцовский индустриальный институт, 2011. – С. 125-128.

63. **Сауц, А.В.** Расчёт загрязнения атмосферы выбросами ТБО / А.В.Сауц, Т.А.Дацюк / Актуальные проблемы строительства и архитектуры. Материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. Часть II. – СПб: СПбГАСУ, 2012. – С. 44-48.

64. **Сауц, А.В.** Численное моделирование рассеивания биогаза с полигонов ТБО и ПО на основе решения уравнения диффузии и Навье-Стокса [Электронный ресурс] / А.В.Сауц / Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 2. URL: <http://www.science-education.ru/108-8757> (дата обращения: 22.10.2013).

65. **Сауц, А.В.** Утилизация вторичных отходов полигонов ТБО как способ энергоресурсосбережения и обеспечения экологической безопасности / А.В.Сауц, В.Л.Горохов / Всерос. конкурс научно-иссл. работ студентов и аспирантов в обл. тех. наук в рамках Всерос. фестиваля науки. Сборник аннотаций науч.-иссл. работ победителей и призеров всерос. конкурса. – М.: РИО МГУДТ, 2011. – С. 245-255.

66. **Сауц, А.В.** Энергетика транспорта. К вопросу эмиссии метана при переработке ТБО / А.В.Сауц, В.Л.Горохов, А.Г.Семёнов / Неделя науки СПбГПУ: материалы XXXX юбилейной Международной научно-практической конференции. – СПб: СПбГПУ, 2011. – С. 73-75.

67. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э.Симиу, Р. Сканлан. – М.: Стройиздат, 1984. – 360 с.

68. Сметанин, В.И. Проект полигона захоронения твердых бытовых отходов / В.И.Сметанин, И.А.Соломин, О.А.Соломина. – М.: МГУП, 2006. – 66 с.

69. СНиП 2.01.28-85. Полигоны по обезвреживанию и захоронению токсичных промышленных отходов. Основные положения по проектированию: Утв. пост-ем Гос. комитета СССР по делам строит-ва от 26.06.85 №9; ввод. в действие с 01.01.86 / Госстрой РФ. – Изд. офиц. – М.: ГП ЦПП, 2004. – 15 с.

70. СП 2.1.7.1038-0: Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов: Взамен СанПиН 2.1.7.722-98; утв. пост-ем Главного санитарного врача РФ; введ. 05.30.2001.

71. СП 20.13330.2011: Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*; утв. Минрегион РФ 19.08.2008; ввод в действие 20.05.2011. – Изд. офиц. – М.: Минрегион РФ, 2012. – 100 с.

72. СП 50.13330.2012: Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003; утв. Минрегион РФ 30.06.2012; ввод в действие 01.07.2013. – Изд. офиц. – М.: Минрегион РФ, 2012. – 100 с.

73. СП 131.13330.2012: Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99; утв. Минрегион РФ 30.06.2012; ввод в действие 01.01.2013. – Изд. офиц. – М.: Минрегион РФ, 2013. – 120 с.

74. Теверовский, Е.И. Допустимые выбросы радиоактивных и вредных химических веществ в приземный слой атмосферы / Е.И.Теверовский, И.А.Терновский. – М.: Энергоатомиздат, 1980 – 240 с.

75. Теверовский, Е.Н. Перенос аэрозольных частиц турбулентными потоками / Е.Н.Теверовский, Е.С.Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.

76. Технологический регламент получения биогаза с полигонов твёрдых бытовых отходов: утв. АКХ им. Памфилова 02.11.1995. – М., 1989. – 19 с.

77. Фёдоров, П.М. Мониторинг геоэкологической системы «полигон твердых бытовых отходов» на примере г. Санкт-Петербурга: дис. ... канд. тех. наук: 25.00.36 / Фёдоров Пётр Михайлович. – СПб, 2005. – 131 с.

78. Филатов, Е.Ю. Преимущество использования методов вычислительной гидродинамики при расчёте ветровой нагрузки, действующей на сооружения различной формы и на строительные комплексы / Е.Ю.Филатов / Вестник ИГЭУ. – Вып. 4. – 2008. – с. 1-4.

79. Шаимова, А.М. Повышение экологической безопасности полигонов и свалок твёрдых бытовых отходов [Электронный ресурс] / А.М.Шаимова, Л.А.Насырова, Г.Г.Ягафарова / Башкирская Ассоциация Экспертов. – 2008. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL:

<http://www.basexpert.ru/konkurs/2008/four/proekt2.pdf> (дата обращения: 22.10.2013).

80. Шаимова, А.М. Повышение экологической безопасности полигонов твердых бытовых отходов путем оптимизации производства биогаза: дис. ... канд. тех. наук: 03.00.16 / Шаимова Алсу Маратовна. – Уфа, 2009. – 178 с.

81. Шаимова, А.М. Разработка математической модели образования биогаза на полигонах твёрдых бытовых отходов / А.М.Шаимова, Л.А.Насырова, Г.Г.Ягафарова, Е.Г.Ильина, Р.Р.Фасхутдинов / Нефтегазовое дело. – 2009. – Том 7, № 1. – С. 137-140.

82. Шаманова, О.Р. Некоторые социальные и технологические аспекты проблемы переработки твердых бытовых отходов / О.Р.Шаманова, Н.А.Приходько, Ж.К.Надирова / Вестник КАСУ №3 – 2006. – С. 164-168.

83. Alexander, A. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM). Version 3.02 User's Guide / A.Alexander, C.Burklin, A.Singleton. – Washington: EPA, 2005. – 48 p.

84. Briggs, J. Municipal Landfill Gas Condensate / J.Briggs / Project Summary, EPA/600/S2-87/090, Feb., 1988. URL: [http://www.scsengineers.com/Papers/Archived_Papers/Briggs_\(1988\)_Municipal_Landfill_Gas_Condensate_\(EPA_Project_Summary\).pdf](http://www.scsengineers.com/Papers/Archived_Papers/Briggs_(1988)_Municipal_Landfill_Gas_Condensate_(EPA_Project_Summary).pdf) (date of access 22.10.2013).

85. Chen, C. Is Landfill Gas Green Energy? / C.Chen, N.Greene / Natural Resources Defense Council. – March, 2003. – New York: NRDC. – 82 p.

86. David Cooper, C. Landfill Gas Emission / C.David Cooper, Debra R.Reinhart, Fred Rash, Debra Seligman, Debra Keely. – Tallahassee: Department of Civil and Environmental Engineering, State University System of Florida, 1992. – 172 p.

87. Deardorff, J.W. A three-dimensional numerical investigation of the idealized planetary boundary layer // Geophysics. Fluid Dynamic, 1970. – v. 1. – p. 377-410.

88. Dosio, A. Turbulent dispersion in the Atmospheric Convective Boundary Layer. Ph. D. thesis / A.Dosio / Wageningen Universiteit, 2005. – 182 p.

89. Feliubadalo, J.A. Generalization of mathematical models for LFG emission / J.A.Feliubadalo / 7th International waste management and landfill symposium. Sardin-

ia, 1999. V. IV. – 37 p.

90. Fletcher, C.A.J. Computational Techniques for Fluid Dynamics 1. Fundamental and General Techniques. Second Edition / C.A.J.Fletcher / Springer-Verlag, 1991. – 401 p.

91. Flir. Getting Started Guide / Flir BXX series. Flir IXX series. Publ. no. T559048, revision 004 / Wilsonville: Flir Systems AB, 2010. – 116 p.

92. Gendebien, A. Landfill gas / A.Gendebien, and others. – Commission of the European Communities. – Brussels, 1998. – 12 p.

93. Hall, D.H. Development of a landfill gas risk assessment model: GASSIM / D.H. Hall, G.M. Attenborough, L.McGoochan, R.G. Gregory. – 2002. System requirement: Adobe Acrobat Reader. – URL: <http://www.lqm.co.uk/free/GasSim%20SWANA%202002.pdf> (date of access 22.10.2013).

94. Peyret, R. Computational Methods for Fluid Flow / R.Peyret, T.Taylor. – New York: Springer-Verlag, 1983. – 358 p.

95. Sauts, A.V. Modeling of atmospheric pollution biogas from landfills with by means of solutions of the equations of turbulent diffusion and the Navier-Stokes equations / A.V.Sauts / Modern scientific researches and innovations. Electronic journal. – March, 2013. – URL: <http://web.snauka.ru/en/issues/2013/03/22980> (date of access 22.10.2013).

96. Sauts, A.V. Reducing air pollution and energy saving achieved by improving gas supply systems using biogas from landfills / A.V.Sauts / Modern technics and technologies. – February 2014. – №2 [Electronic journal]. – URL: <http://technology.snauka.ru/en/2014/02/3141> (date of access 18.02.2014).

97. Sauts A.V. Solution of problems of air protection in the Comsol Multiphysics (for example, diffusion of biogas from landfills). Using Comsol Script™ / A.V.Sauts / Modern technics and technologies. – October 2013. – №10 [Electronic journal]. URL: <http://technology.snauka.ru/en/2013/10/2412> (date of access 22.10.2013).

98. Steyer, E.A. biological pluridisciplinary model to predict municipal landfill

life / E.Steyer, S.Hiligsmann, J.P.Radu / 7th International waste management and landfill symposium. – Sardinia, 1999. – Vol. I. – p. 37-45.

99. Vasudevan Rajram. From Landfill Gas to Energy – Technologies and Challenges / Vasudevan Rajaram, Faisal Zia Siddiqui, Mohd Emran Khan. – New York: CRC Press, 2011. – 404 c.

100. Veronica K. Figueroa. Estimating Landfill Greenhouse Gas Emissions from Measured Ambient Methane Concentrations and Dispersion Modeling / Veronica K.Figueroa, C.David Cooper, Kevin R.Mackie / Tallahassee: Department of Civil and Environmental Engineering, University of Central Florida, 2010. – 17 p.

101. Weber, B. Minimierung von Emissionen der Deponie / B.Weber / Veröffentlichung des Institutes for Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik der Universität Hannover, Heft 74, 1990. – p. 46.

102. Wellinger, A. Biogas upgrading and utilization / A.Wellinger, M.Persson / IEA Bioenergy, 13 October 2006. – 32 p.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Результаты расчётов эмиссии компонентов биогаза на полигонах ПТО-1

«Волхонский» и ПТО-3 «Новосёлки»

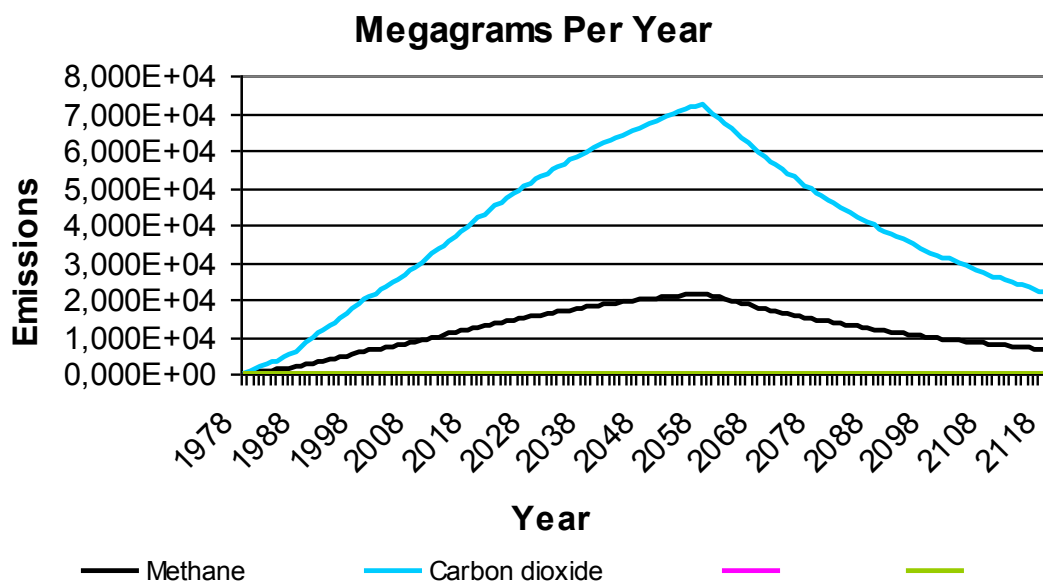


Рисунок П.1.1 а – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-1 «Волхонский», т/год

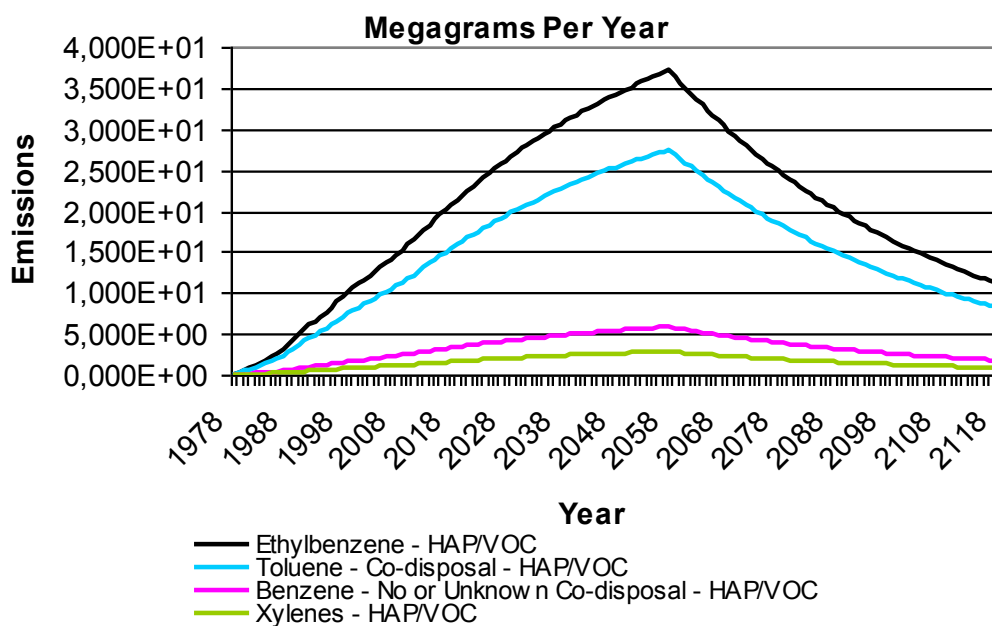


Рисунок П.1.1 б – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-1 «Волхонский», т/год

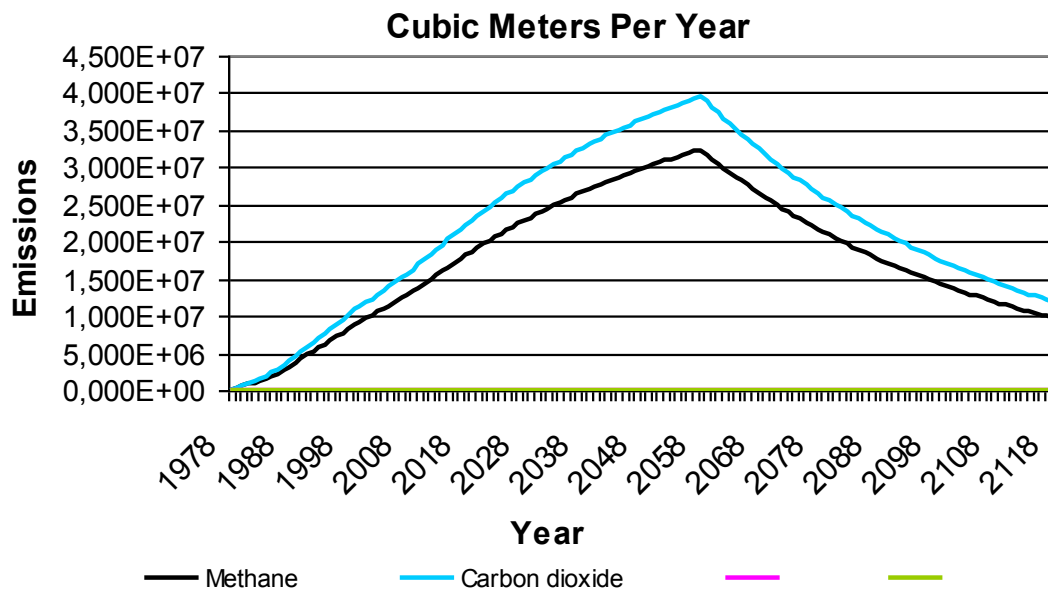


Рисунок П.1.1 в – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-1 «Волхонский», м³/год

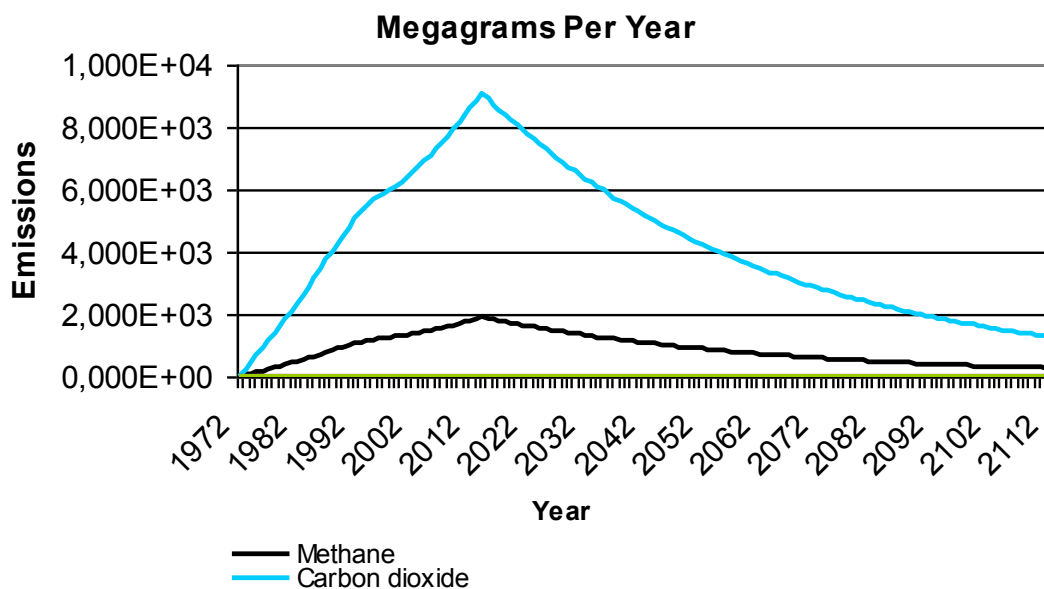


Рисунок П.1.2 а – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки», т/год

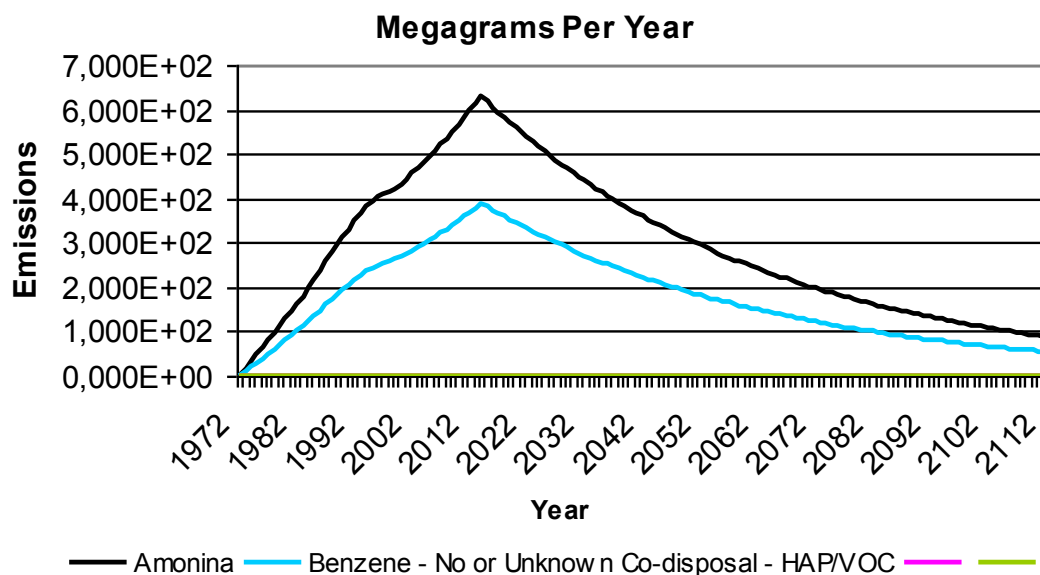


Рисунок П.1.2 б – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки», т/год

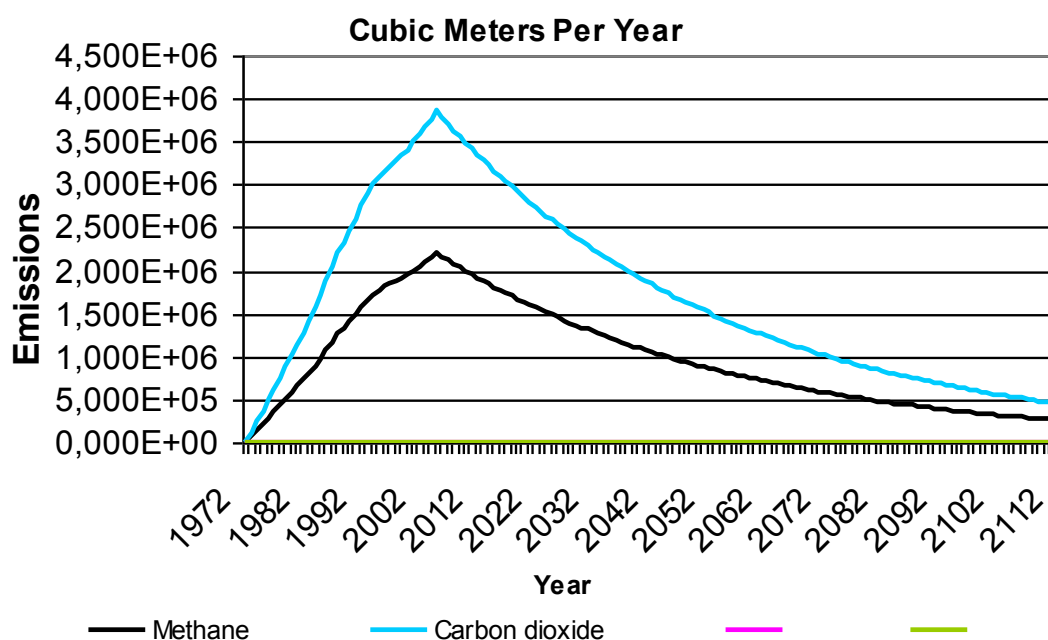


Рисунок П.1.2 в – Эмиссия биогаза на полигоне ПТО-3 «Новосёлки», м³/год

Обозначения на рисунках П.1.1 а-в и П.1.2 а-в: Methane – метан; Carbon dioxide– углекислый газ; Benzene - No or Unknown Co-disposal - HAP/VOC – бензол (при неизвестных или неточных данных о его содержании); Toluene Co-disposal- HAP/VOC– толуол; Ethyl benzene – этилбензол; Xylenes HAP/VOC – ксилолы (смесь изомеров); Amonima – аммиак.

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Пример скрипта, написанного для расчётов в «Comsol Multiphysics»

```
% COMSOL Multiphysics Model M-file
% Generated by COMSOL 3.5a (COMSOL 3.5.0.603, $Date: 2008/12/03 17:02:19 $)
% Some geometry objects are stored in a separate file.
% The name of this file is given by the variable 'flbinaryfile'.

flclear fem

% COMSOL version
clear vrsn
vrsn.name = 'COMSOL 3.5';
vrsn.ext = 'a_max';
vrsn.major = 0;
vrsn.build = 603;
vrsn.rcs = '$Name: $';
vrsn.date = '$Date: 2008/12/03 17:02:19 $';
fem.version = vrsn;

flbinaryfile='dissipation of biogas from landfills v.1.0.mphm';

% Constants
fem.const = {'W_s','0', ...
    'k_f','4', ...
    'epsilon','0.2', ...
    'Mcomp','5', ...
    'h_isol','0.2', ...
    'tau','100000', ...
    'Diffusiv','3.4e-5', ...
    'gamma','0.001', ...
    'Ccomp','50', ...
    'Pamb','1e5', ...
    'Tamb','25', ...
    'Udin','3', ...
    'Hsr','10', ...
    'z0','0.2', ...
    'C','0.0115', ...
    'alpha','0.707106781', ...
    'a_max','4', ...
    'Twarm','170', ...
    'V_waste','373134.33'};

% Geometry
clear draw
g15=flbinary('g15','draw',flbinaryfile);
draw.s.objs = {g15};
draw.s.name = {'CO15'};
draw.s.tags = {'g15'};
fem.draw = draw;
fem.geom = geomcsg(fem);
```

```

clear mesh
mesh.default = flbinary('m1','mesh',flbinaryfile);
mesh.case = {flbinary('m2','mesh',flbinaryfile)};
mesh.mind = {[1]};
fem.mesh = mesh;

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'FlConvDiff';
appl.shape = {'shlag(1,'c')'};
appl.gporder = 2;
appl.cporder = 1;
appl.assignsuffix = '_cd';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.N = {0,0,'Mud'};
bnd.type = {'N0','Nc','N'};
bnd.ind = [2,2,1,2,2,1,1,1,1,1,3,3,3,3,3,3,3,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1, ...
    1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,3,3,3,3,3,3,3,3,1,1, ...
    ...
    1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.D =
'4.160167646*k_f+0.707106781*epsilon*(a^2)*((ux)^2+(vy)^2+(wz)^2+0.5*((vx+u
y)^2+(wy+vz)^2+(uz+wx)^2))^0.5';
equ.w = 'w-W_s';
equ.v = 'v';
equ.u = 'u';
equ.name = 'physical parameters of the atmosphere in the zone of landfill';
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'FlNavierStokes';
appl.shape =
{'shlag(1,'u')','shlag(1,'v')','shlag(1,'w')','shlag(1,'p')'};
appl.gporder = 2;
appl.cporder = 1;
appl.assignsuffix = '_ns';
clear prop
prop.analysis='static';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2','lm3','lm4','lm5'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.v0 = {'-profil_v','-pv',0,0};
bnd.u0 = {'profil_u','pu',0,0};
bnd.type = {'inlet','outlet','walltype','sym'};
bnd.velType = {'u0','u0','U0in','U0in'};

```



```

tion at their disposal, cubic meters per year','Z0','resistance coefficient, m','W_s','settling velocity of the impurities in the atmosphere for light inert gas impurities 0; Heavy 0.001, 0.008 for aerosols m/sec','Ccomp','the concentration of the components in the biogas at the time of its release in the body of the landfill, mg/cubic m','gamma','coefficient of gas seepage through the soil, m/sec (default is 0.001)','Twarm','duration of the warm period of the year, days','tau','duration of continuous operation of the landfill, years','h_isol','thickness of the insulating filling (default made ??0.2 m)','alpha','angle between the direction of the wind at the entrance to the settlement area boundary and the x axis, radian','epsilon','constant in the Smagorinsky model (the default is assumed to be 0.2)'};
fem.descr = descr;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

% Extend mesh
fem.xmesh=meshextend(fem, ...
                    'mcase',[0], ...
                    'dofversion',1);

% Retrieve solution
fem.sol=flbinary('sol1','solution',flbinaryfile);

% Save current fem structure for restart purposes
fem0=fem;

% (Default values are not included)

% Application mode 1
clear appl
appl.mode.class = 'FlConvDiff';
appl.shape = {'shlag(1,'c')'};
appl.gporder = 2;
appl.cporder = 1;
appl.assignsuffix = '_cd';
clear prop
prop.analysis='static';
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.N = {0,0,'Mud'};
bnd.type = {'N0','Nc','N'};
bnd.ind = [2,2,1,2,2,1,1,1,1,1,3,3,3,3,3,3,3,3,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1, ...
          1,1,3,1,1,1,1,1,1,1,1,3,1,1,1,1,1,1,3,1,1,3,3,3,3,3,3,3,3,3,1,1, ...
          ...
          1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.D = '2*(9^(1/3))*k_f+(2^-
0.5)*epsilon*(a^2)*((ux)^2+(vy)^2+(wz)^2+0.5*((vx+uy)^2+(wy+vz)^2+(uz+wx)^2

```

```
)^0.5';
equ.w = 'w-W_s';
equ.v = 'v';
equ.u = 'u';
equ.name = 'physical parameters of the atmosphere in the zone of landfill';
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{1} = appl;

% Application mode 2
clear appl
appl.mode.class = 'FlNavierStokes';
appl.shape = {'shlag(1,'u')','shlag(1,'v')','shlag(1,'w')','shlag(1,'p')'};
appl.gporder = 2;
appl.cporder = 1;
appl.assignsuffix = '_ns';
clear prop
prop.analysis='static';
clear weakconstr
weakconstr.value = 'off';
weakconstr.dim = {'lm2','lm3','lm4','lm5'};
prop.weakconstr = weakconstr;
appl.prop = prop;
clear bnd
bnd.v0 = {'-profil_v','-pv',0,0};
bnd.u0 = {'profil_u','pu',0,0};
bnd.type = {'inlet','outlet','walltype','sym'};
bnd.velType = {'u0','u0','U0in','U0in'};
bnd.outtype = {'p','p0','p','p'};
bnd.ind = [1,2,3,4,1,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,...
          3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,...
          ...
          3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,3,2];
appl.bnd = bnd;
clear equ
equ.eta = '6e-6+Tamb*4e-8';
equ.impreson = 1;
equ.rho = 'Pamb*3.464e-3/Tamb';
equ.usedElement = 'Lag1';
equ.cdon = 0;
equ.stabElmType = 'usesELM';
equ.finestMCelem = 'Lag1';
equ.ind = [1];
appl.equ = equ;
fem.appl{2} = appl;
fem.frame = {'ref'};
fem.border = 1;
clear units;
units.basesystem = 'SI';
fem.units = units;

% Scalar expressions
fem.expr = {'profil_u','2.5*Udin*log((z-Hsr+Z0/C)/Z0)*cos(alpha)',...
            'profil_v','2.5*Udin*log((z-Hsr+Z0/C)/Z0)*sin(alpha)',...
            'Cpov','(27*Twarm*Diffusiv*0.33*Ccomp*Vpol+312500*
Mcomp*z*h_isol)/(27*Twarm*Vpol*(Diffusiv+gamma*h_isol))',...
            'Mud','312500*Mcomp*z/(27*Vpol*Twarm)',...}
```

```

'Vpol','V_waste*(1-0.97^tau)*0.97^tau/0.03'};

% Descriptions
clear descr
descr.expr= {'Vpol','volume occupied by landfill, cubic m','Mud','emission
component of biogas from the landfill area, mg / (kv.m.sek) (boundary con-
dition of the 2nd kind is used in the absence of land-
filling)','Cpov','concentration of the component of biogas at the landfill
surface (boundary condition of the 2nd kind is used in the absence of land-
filling)','profil_v','y-oic wind component on the input boundary of the
computational domain','profil_u','x-oic wind component on the input bounda-
ry of the computational domain'};
fem.descr = descr;

% Global expressions
fem.globalexpr = {'uu','u', ...
    'ww','w', ...
    'vv','v'};

% Descriptions
descr = fem.descr;
descr.const= {'Pamb','atmospheric pressure Pa','Hsr','average height of
wind barriers, m','Diffusiv','diffusivity of the soil from which the fill-
ing,square m/sec','Tamb','background air temperature, K','a_max','maximum
line size tetraedricheskogo finite element, m','C','roughness parame-
ter','k_f','background coefficient eddy viscosity Smagorinsky model, square
m/sec (default is assumed to be 4)','Mcomp','emission component of the bio-
gas emitted from around the landfill or software mg/sec','Udin','dynamic
speed, m/s','V_waste','estimated volume occupied by sealed waste and isola-
tion at their disposal, cubic meters per year','Z0','resistance coeffi-
cient, m','W_s','settling velocity of the impurities in the atmosphere for
light inert gas impurities 0; Heavy 0.001, 0.008 for aerosols
m/sec','Ccomp','the concentration of the components in the biogas at the
time of its release in the body of the landfill, mg/cubic
m','gamma','coefficient of gas seepage through the soil, m/sec (default is
0.001)','Twarm','duration of the warm period of the year,
days','tau','duration of continuous operation of the landfill,
years','h_isol','thickness of the insulating filling (default made ??0.2
m)','alpha','angle between the direction of the wind at the entrance to the
settlement area boundary and the x axis, radian','epsilon','constant in the
Smagorinsky model (the default is assumed to be 0.2)'};
fem.descr = descr;

% ODE Settings
clear ode
clear units;
units.basesystem = 'SI';
ode.units = units;
fem.ode=ode;

% Multiphysics
fem=multiphysics(fem);

```


ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Результаты расчётов с помощью разработанной методики

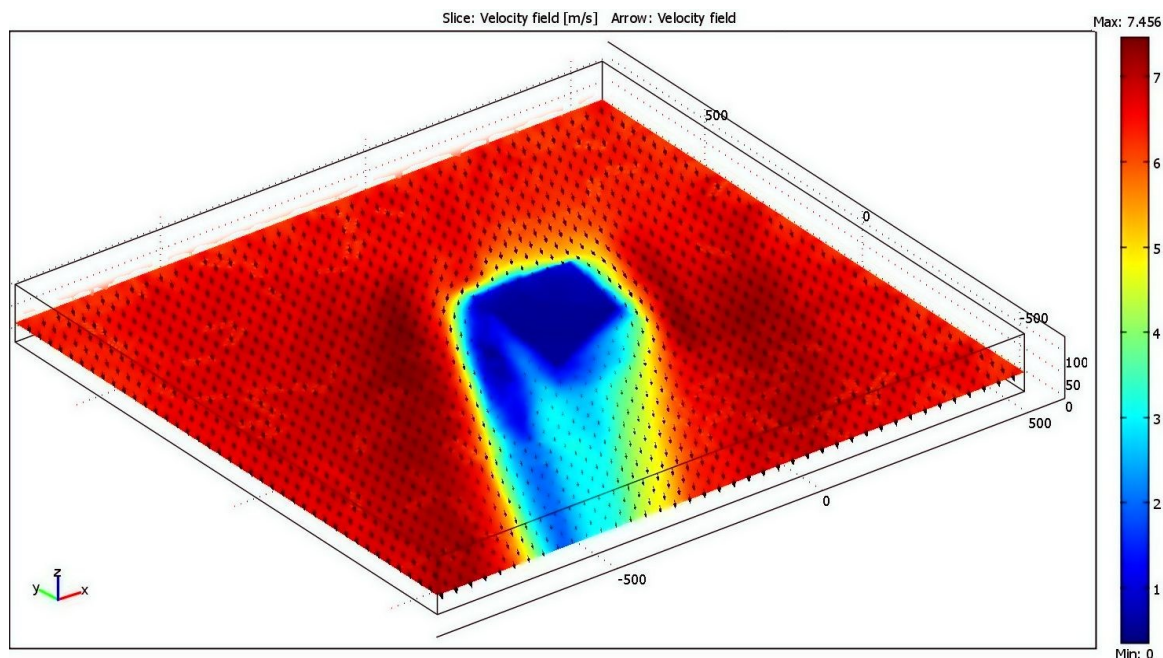


Рисунок П 3.1 – Поле скоростей ветра, м/с, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 31.08.01

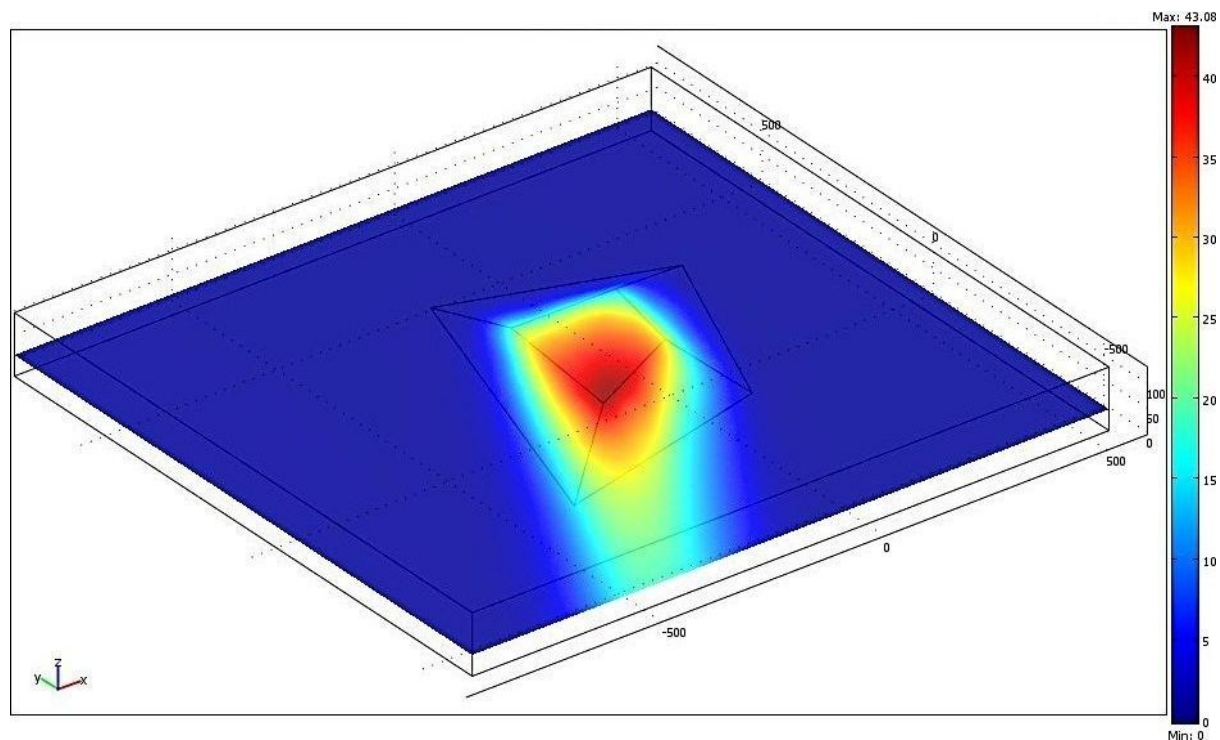


Рисунок П 3.2 – Поле концентраций метана, mg/m^3 , на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 31.08.01

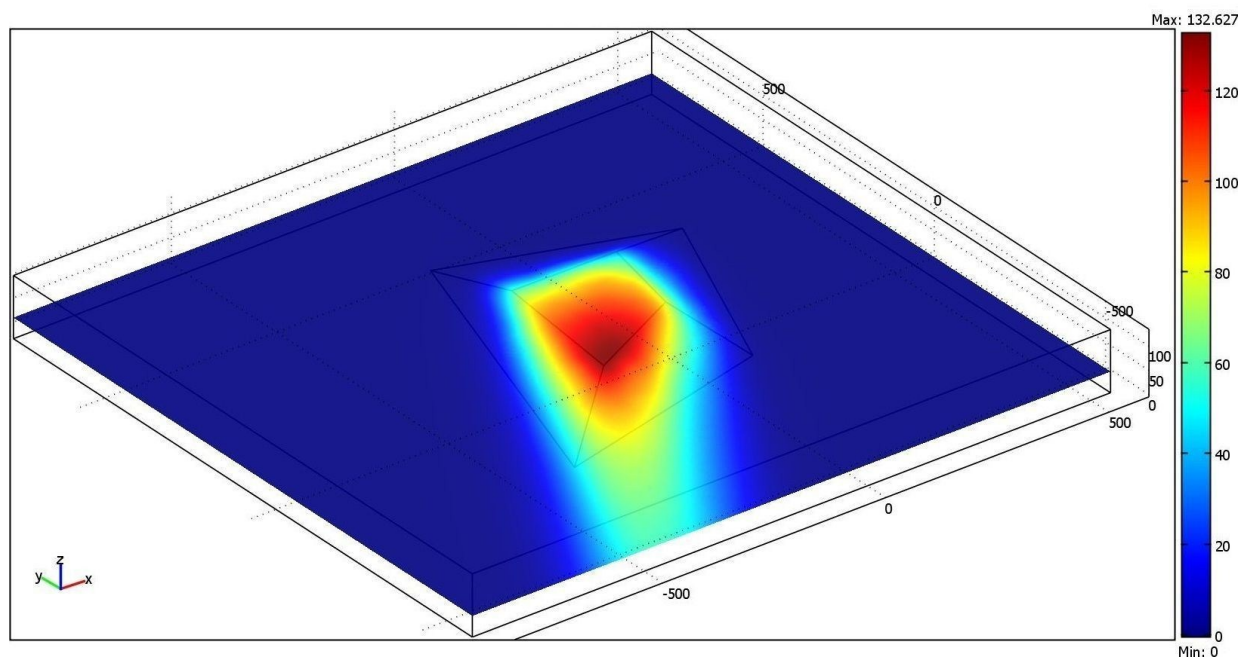


Рисунок П 3.3 – Поле концентраций углекислого газа, мг/м³, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 31.08.01

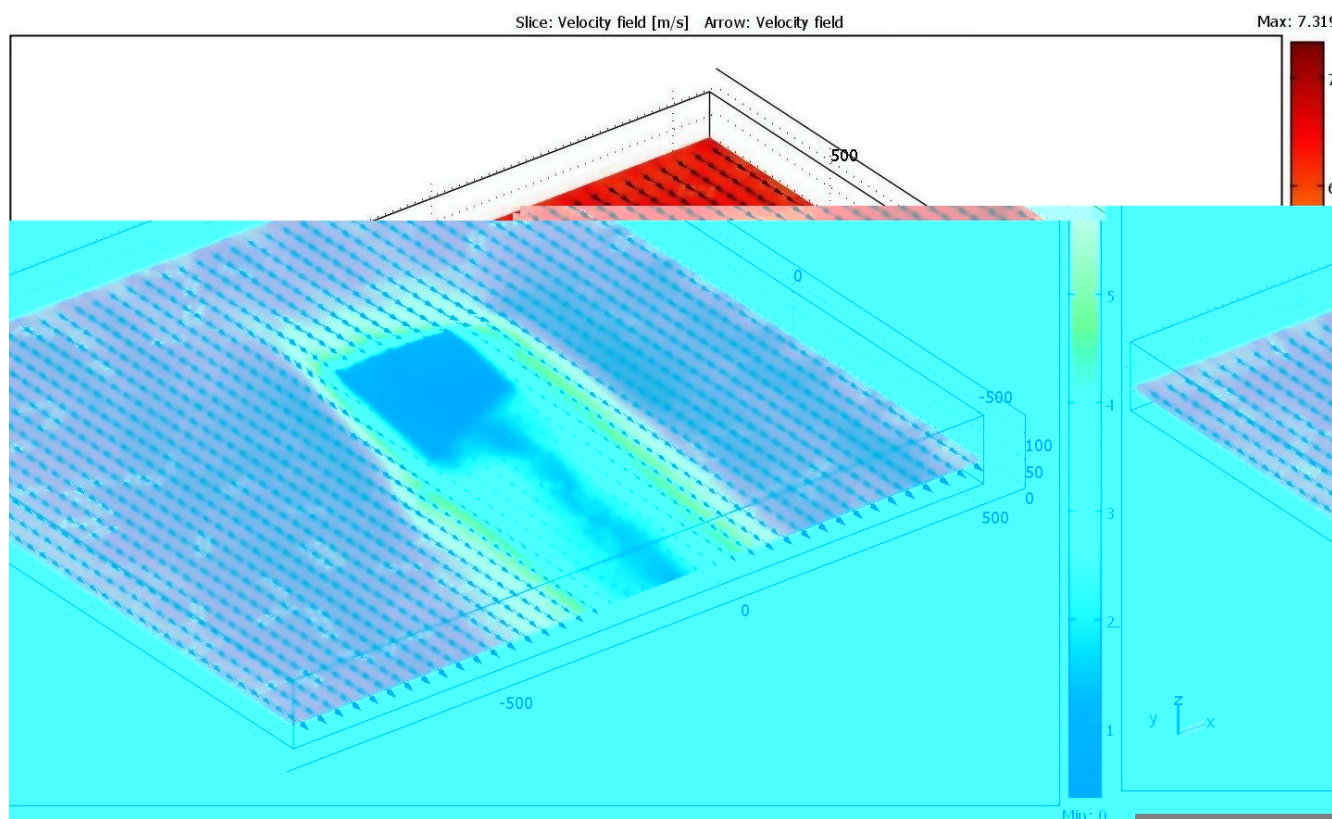


Рисунок П 3.4 – Поле скоростей ветра, м/с, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01

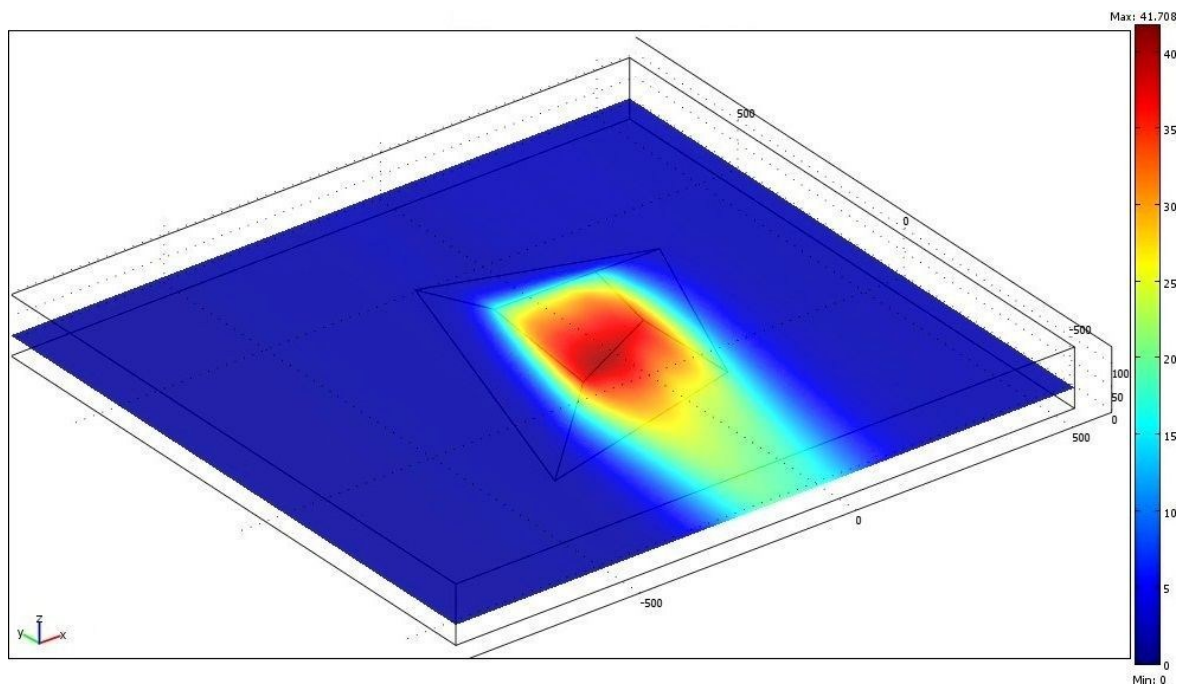


Рисунок П 3.5 – Поле концентраций метана, mg/m^3 , на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01

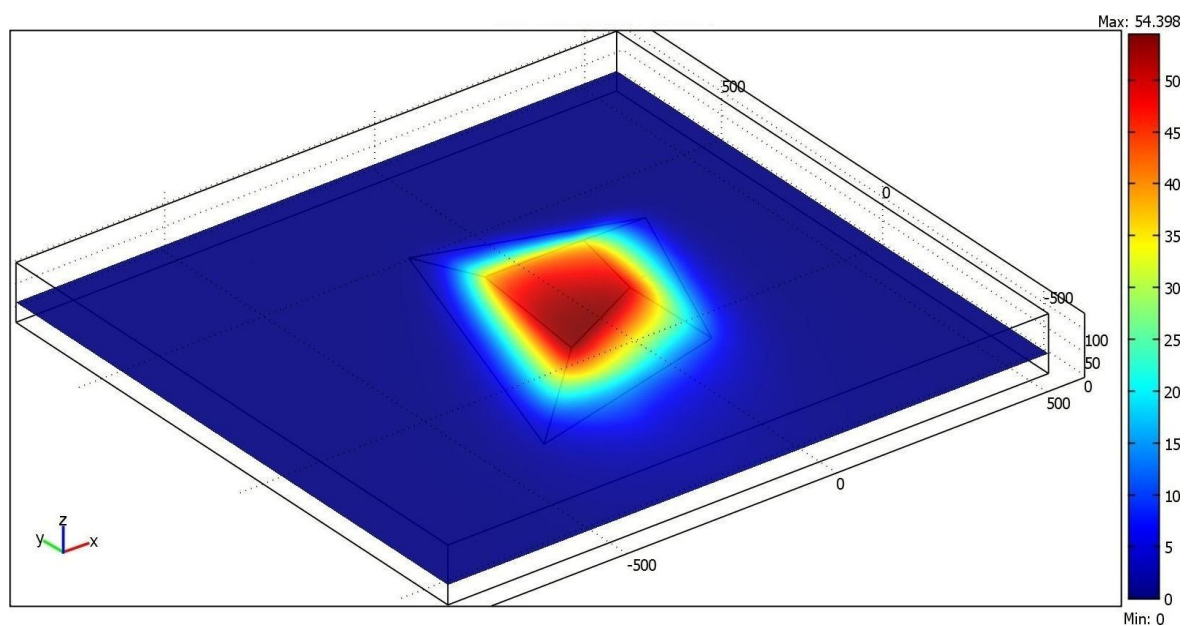


Рисунок П 3.6 – Поле концентраций углекислого газа, mg/m^3 , на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01

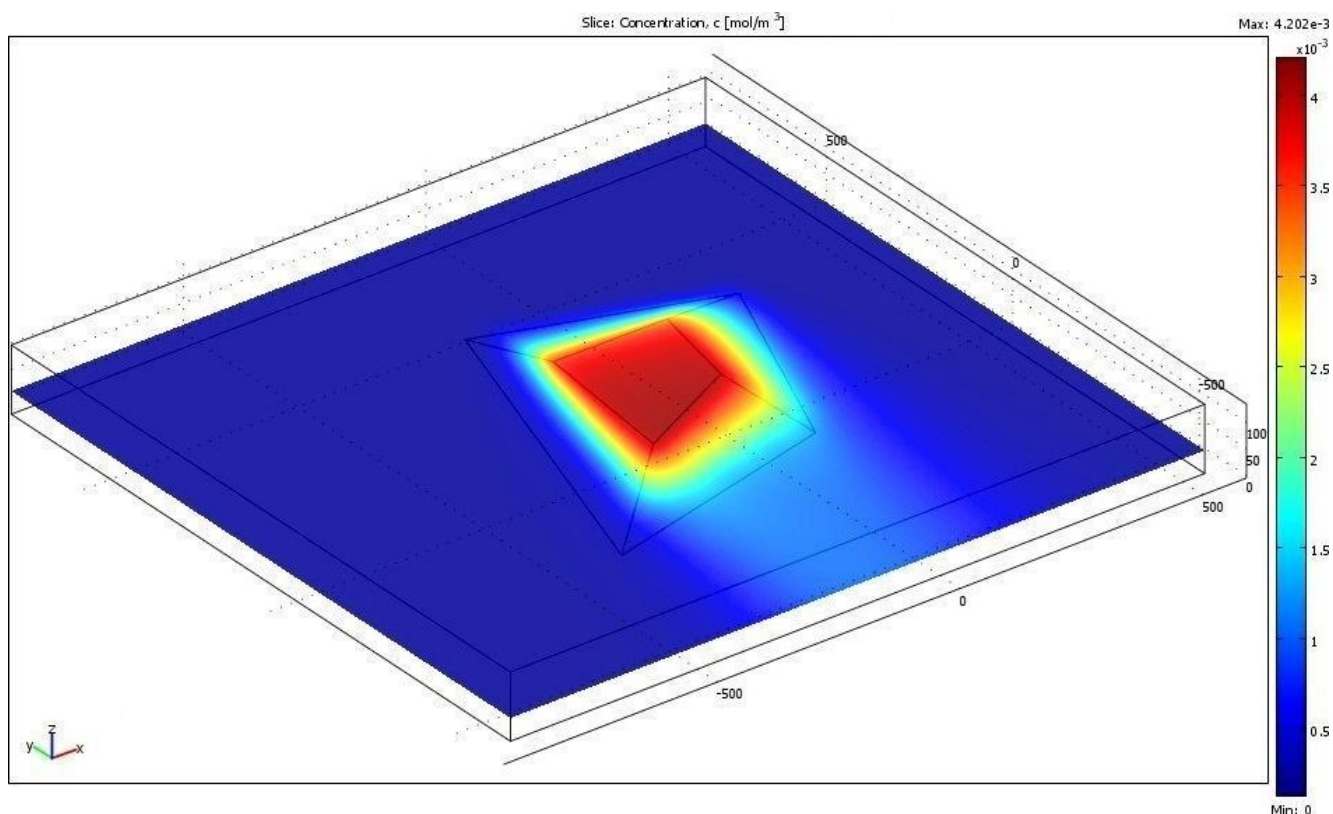


Рисунок П 3.7 – Поле концентраций бензола, мг/м³, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01

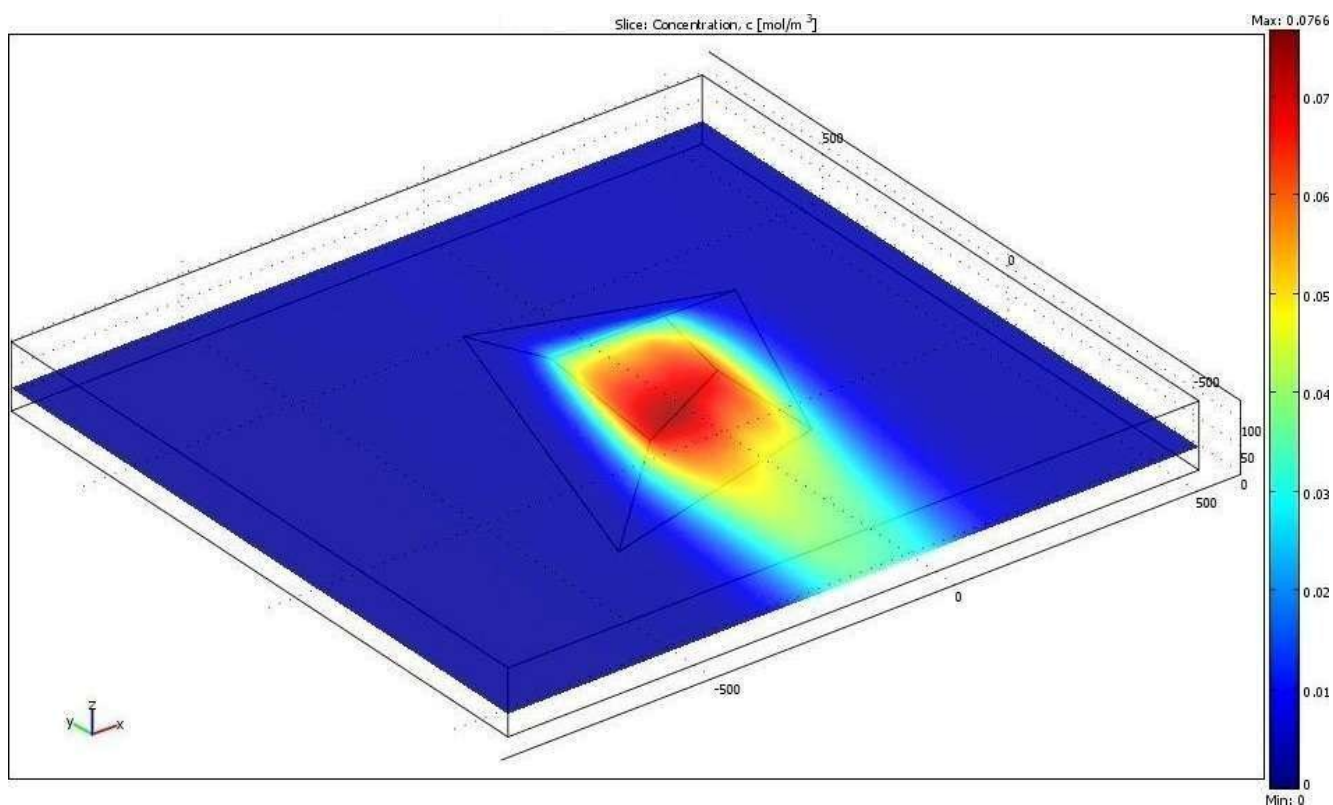


Рисунок П 3.8 – Поле концентраций ксилола, мг/м³, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-1 «Волхонский» 24.09.01

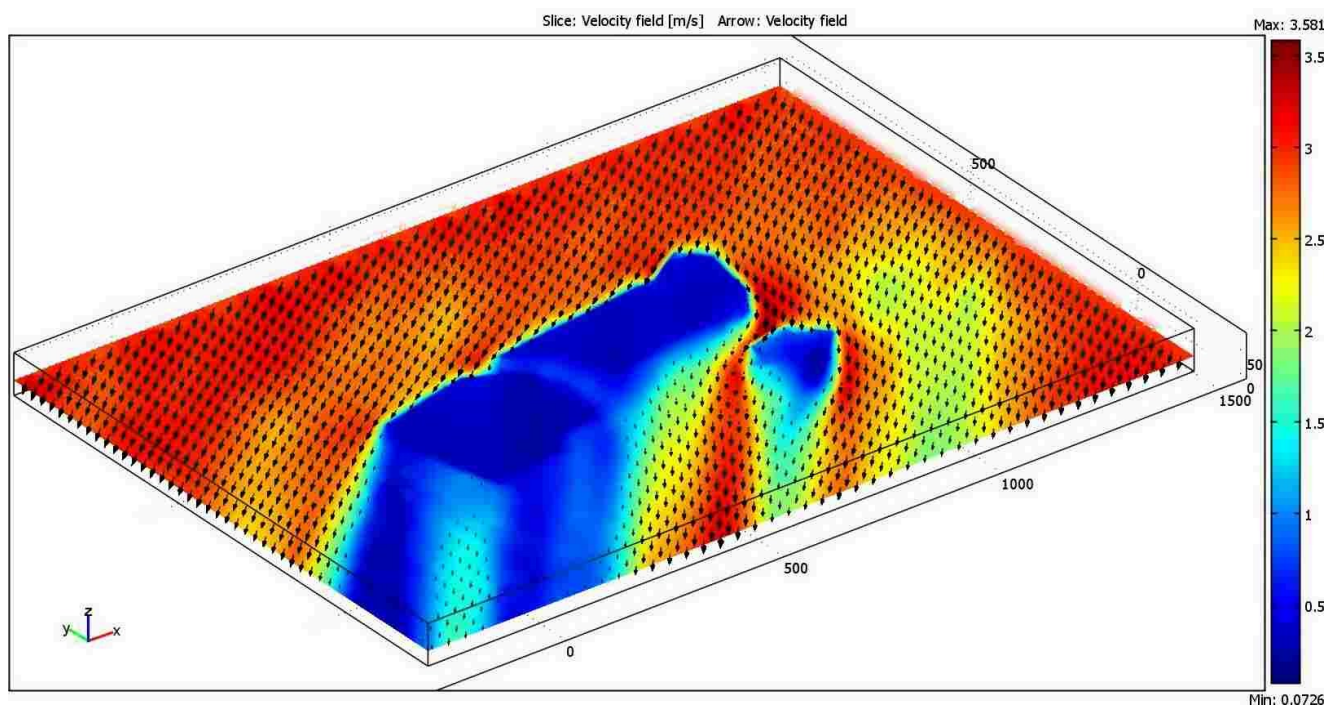


Рисунок П 3.9 – Поле ветра давления, м/с, на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01

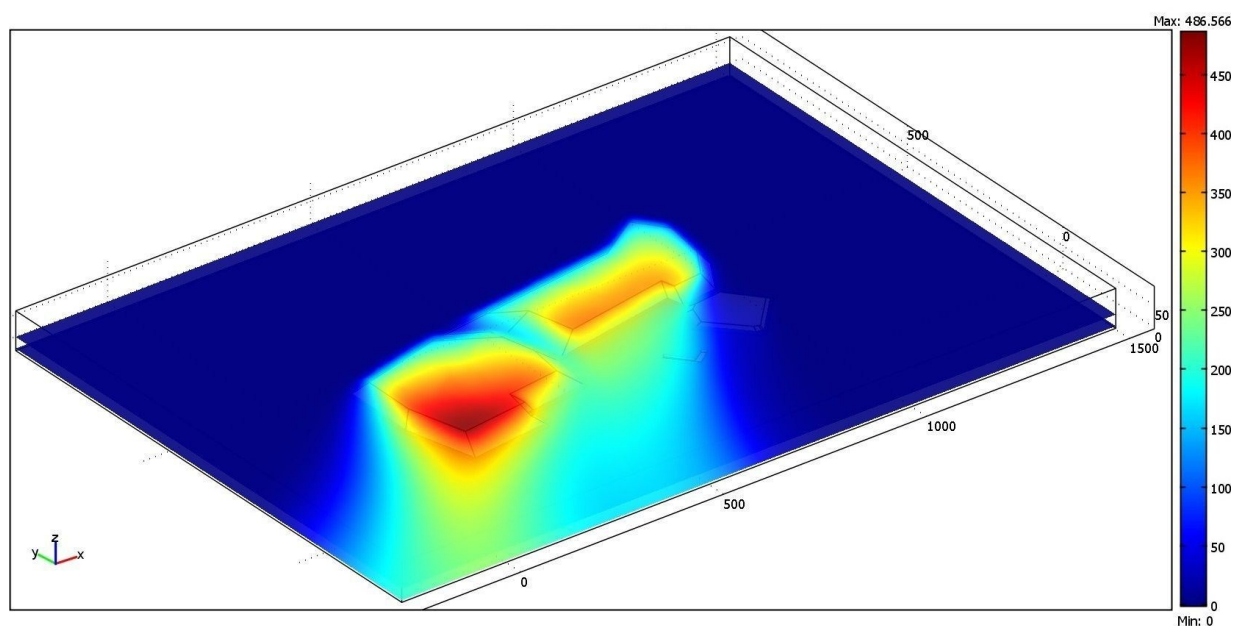


Рисунок П 3.10 – Поле концентраций метана, мг/м^3 , на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01

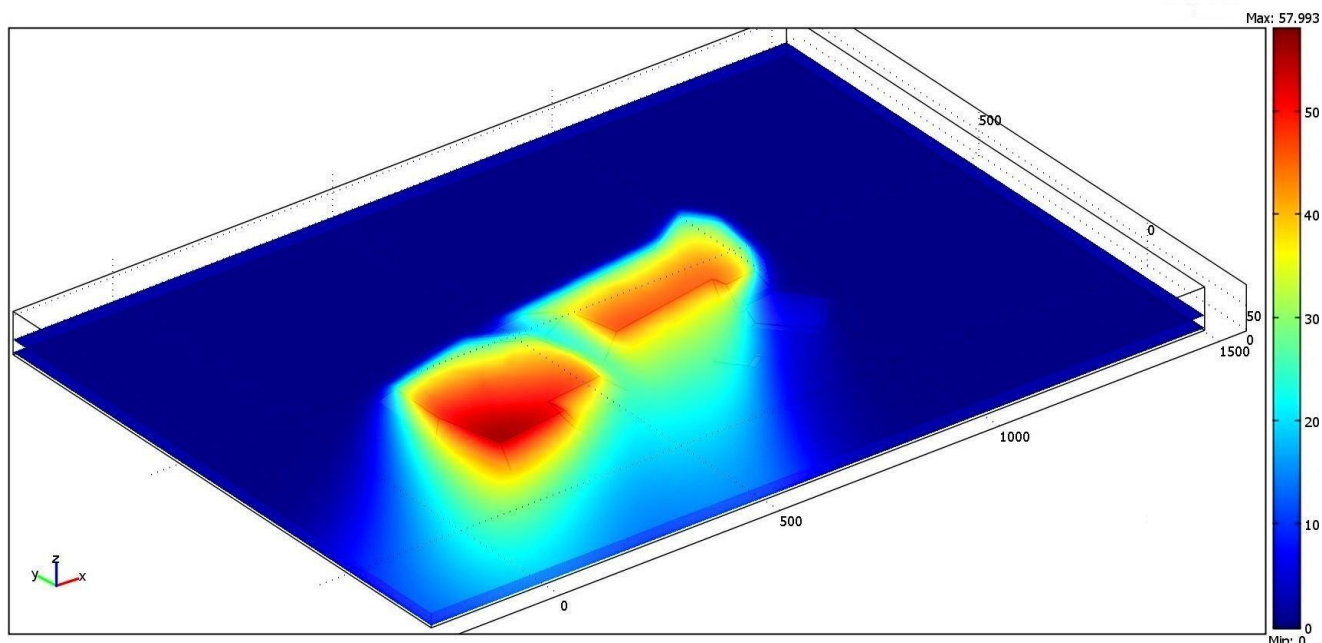


Рисунок П 3.11 – Поле концентраций углекислого газа, мг/м^3 , на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01

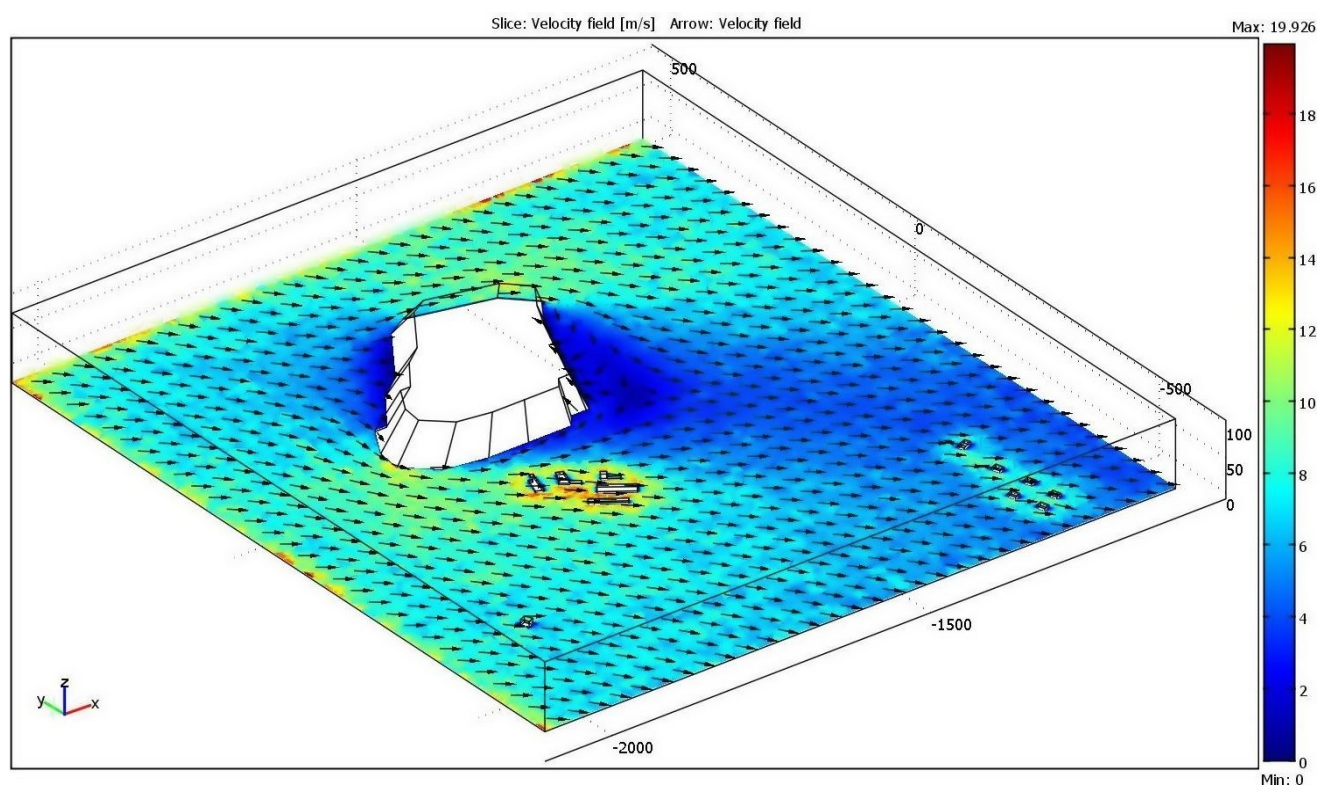


Рисунок П 3.12 – Поле среднегодовых скоростей скоростей ветра, м/с , в районе полигона «Центральный» на высоте 2 м

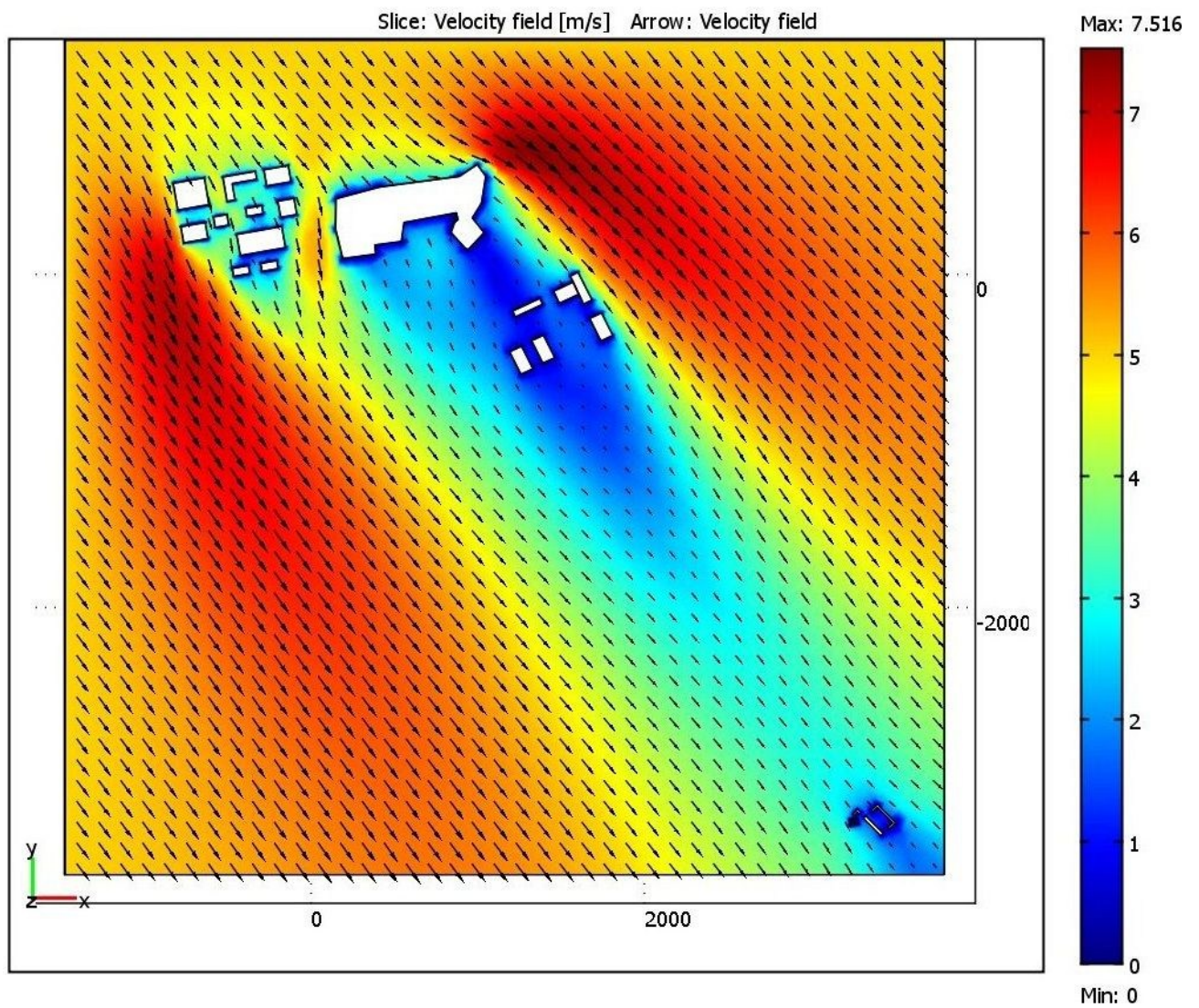


Рисунок П 3.13 – Поле скорости ветра в районе полигона ПТО-3 «Новосёлки» 11.03.14

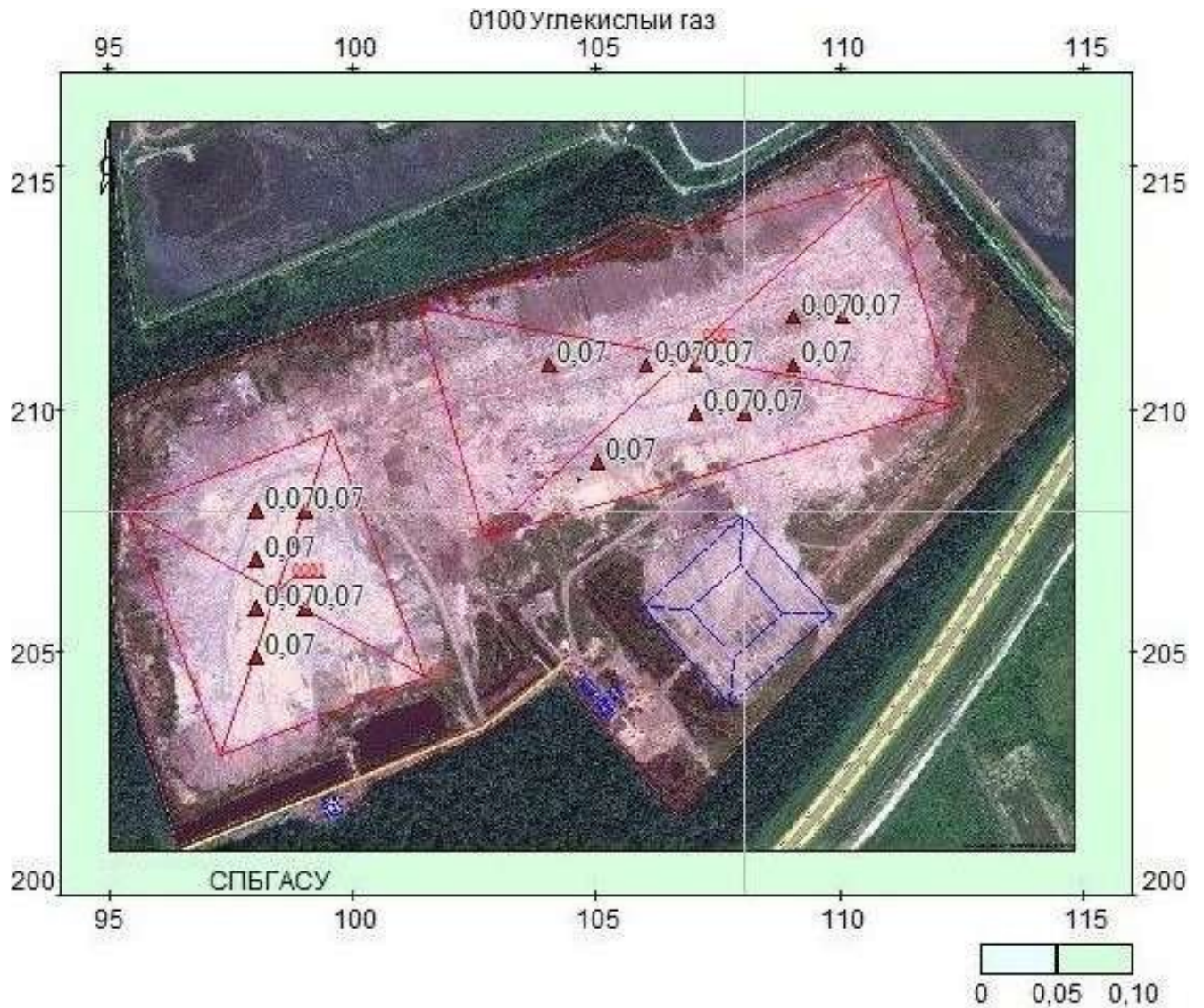
ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Результаты расчётов с помощью ОНД-86 (УПРЗА «Эколог-ГАЗ 3.0»)



Объект: 101, ПТО-3 "Новосёлки"; вар.исх.д. 1; вар.расч.1; пл.1(h=2м) Масштаб 1:220

Рисунок П.4.1 – Поле концентраций метана в долях ОБУВ на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01



Объект: 101, ПТО-3 "Новосёлки"; вар.исх.д. 1; вар.расч.1; пл.1(h=2м) Масштаб 1:220

Рисунок П.4.2 – Поле концентраций метана в долях среднесуточной ПДК на высоте 1,8 м над верхней площадкой полигона ПТО-3 «Новосёлки» 26.08.01

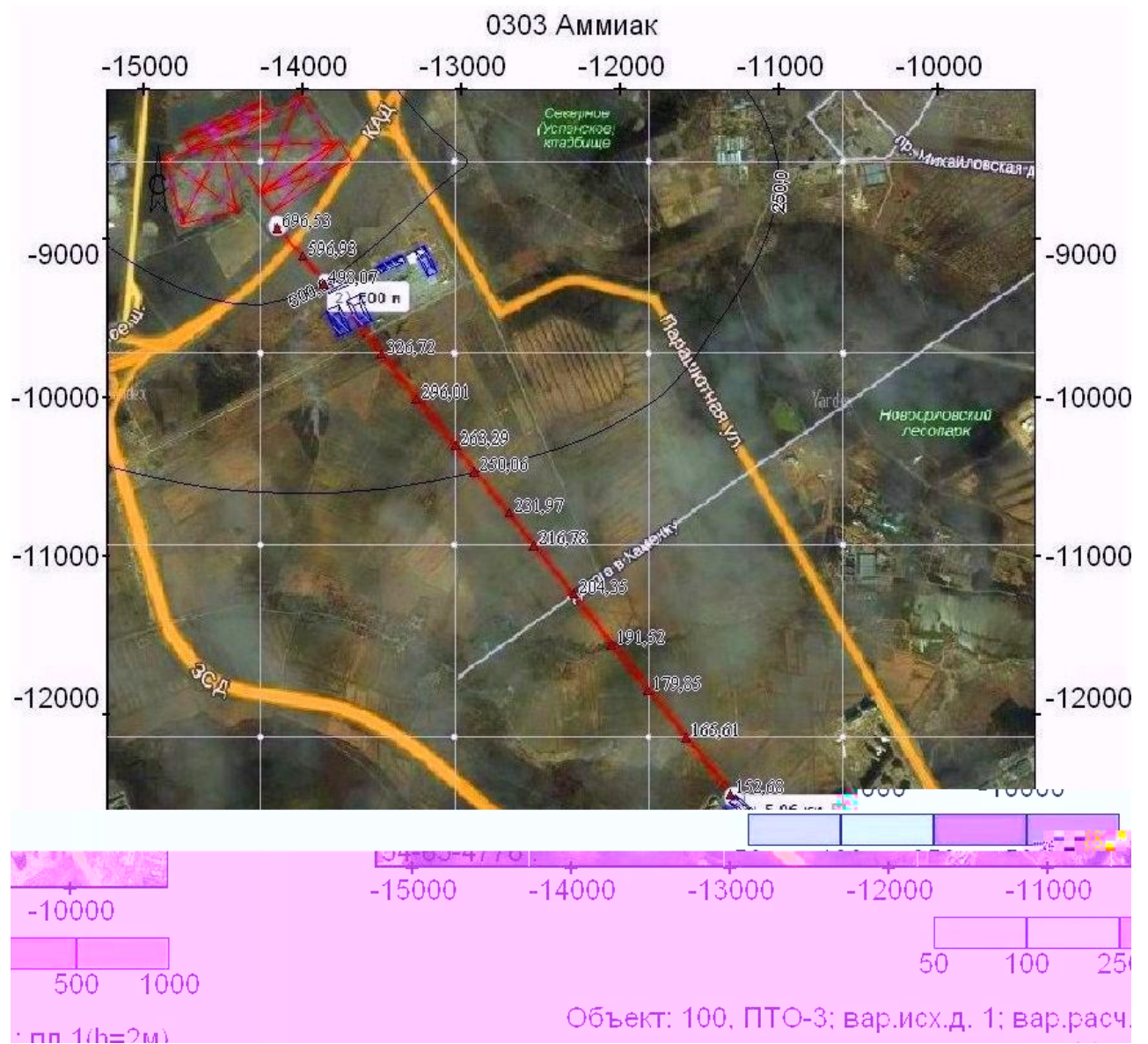


Рисунок П.4.3 – Поле приземных концентраций аммиака в долях среднесуточной ПДК вблизи полигона ПТО-3 «Новосёлки» 11.03. 14

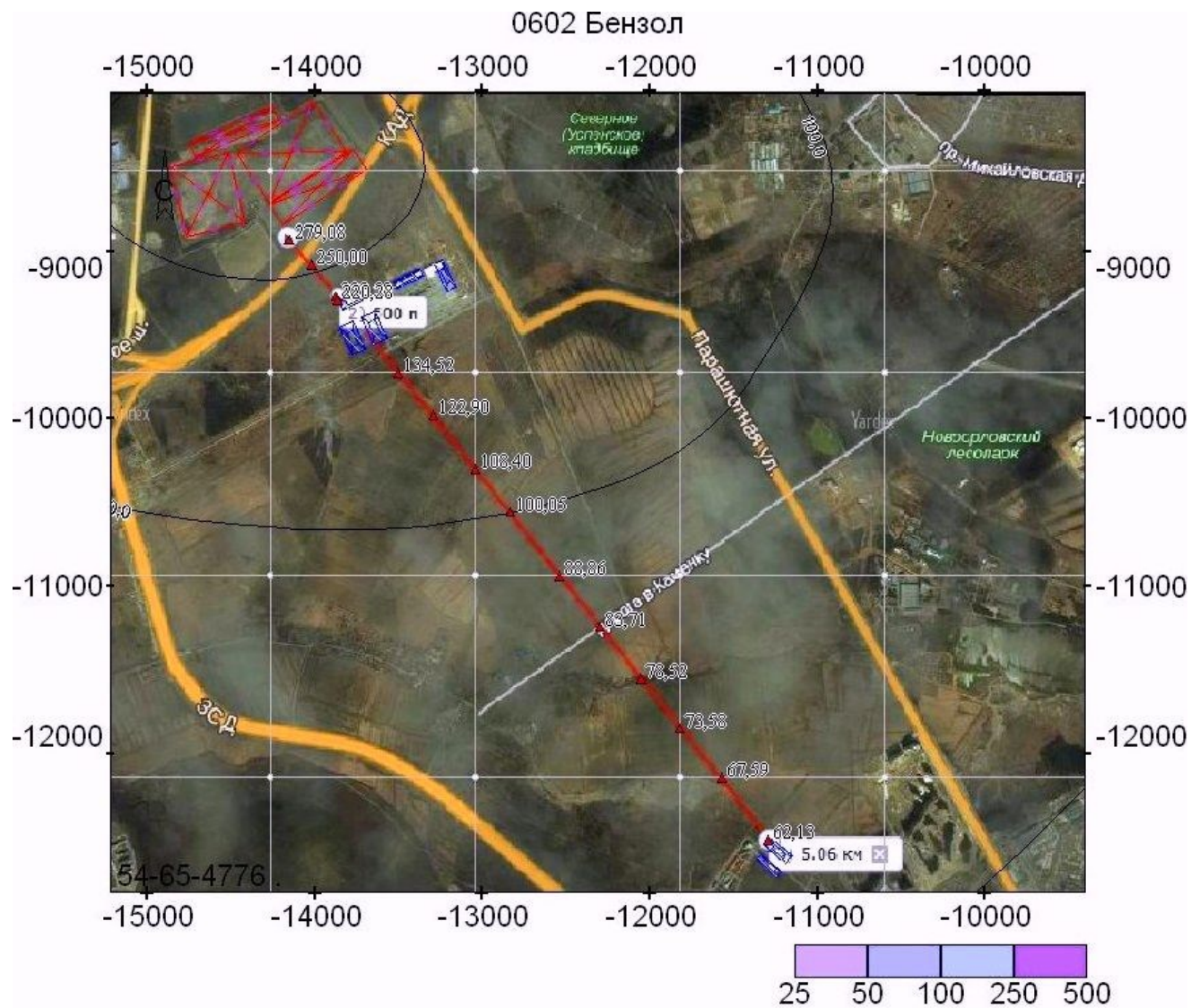


Рисунок П.4.3 – Поле приземных концентраций аммиака в долях среднесуточной ПДК вблизи полигона ПТО-3 «Новосёлки» 11.03.14

Рисунок П.4.1 – Поле концентраций метана в долях ОБУВ на полигоне «Центральный» Волгограда в 2007 г.

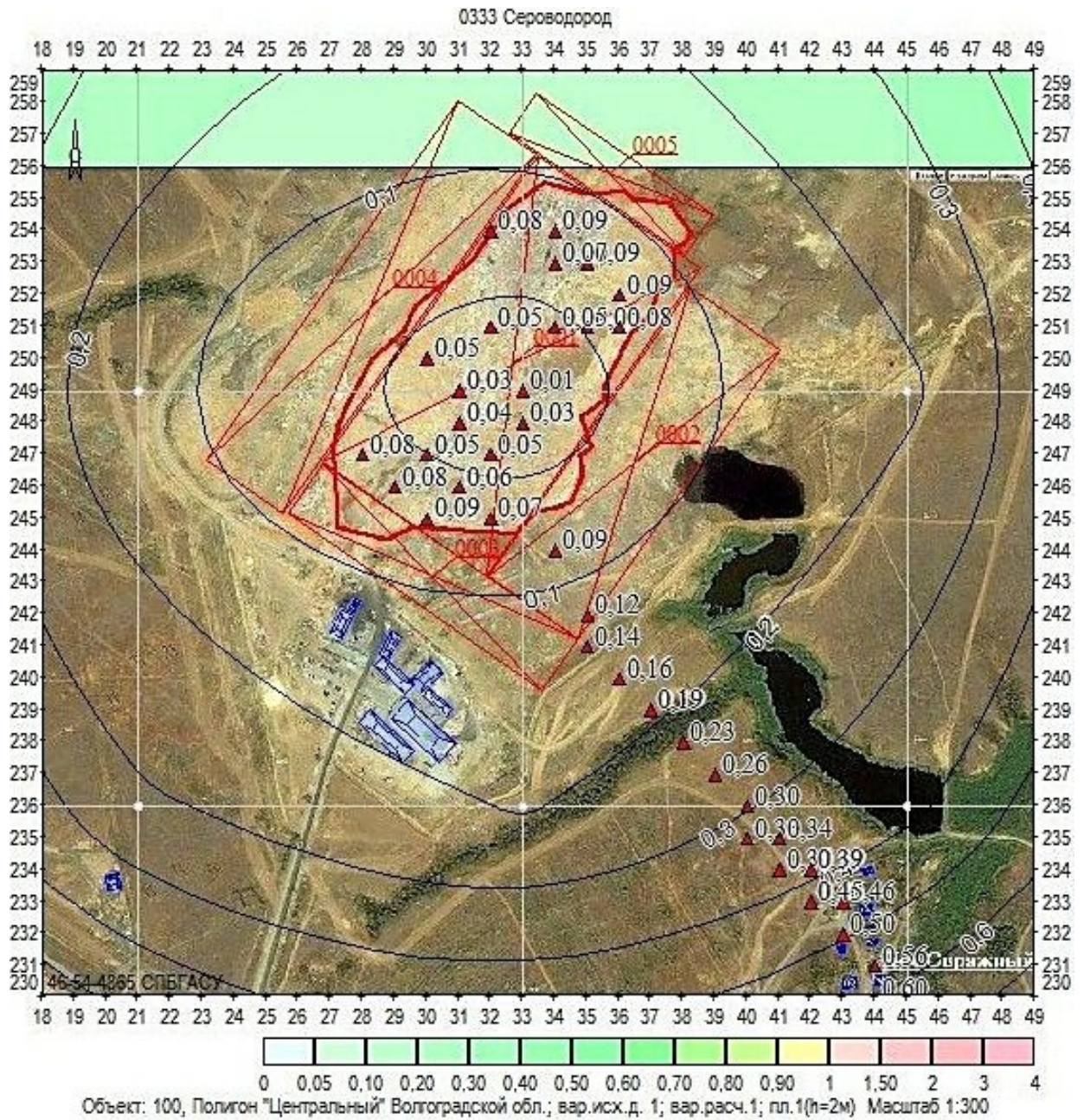


Рисунок П.4.2 – Поле концентраций сероводорода в долях ПДК на полигоне «Центральный» Волгограда в 2006 г.

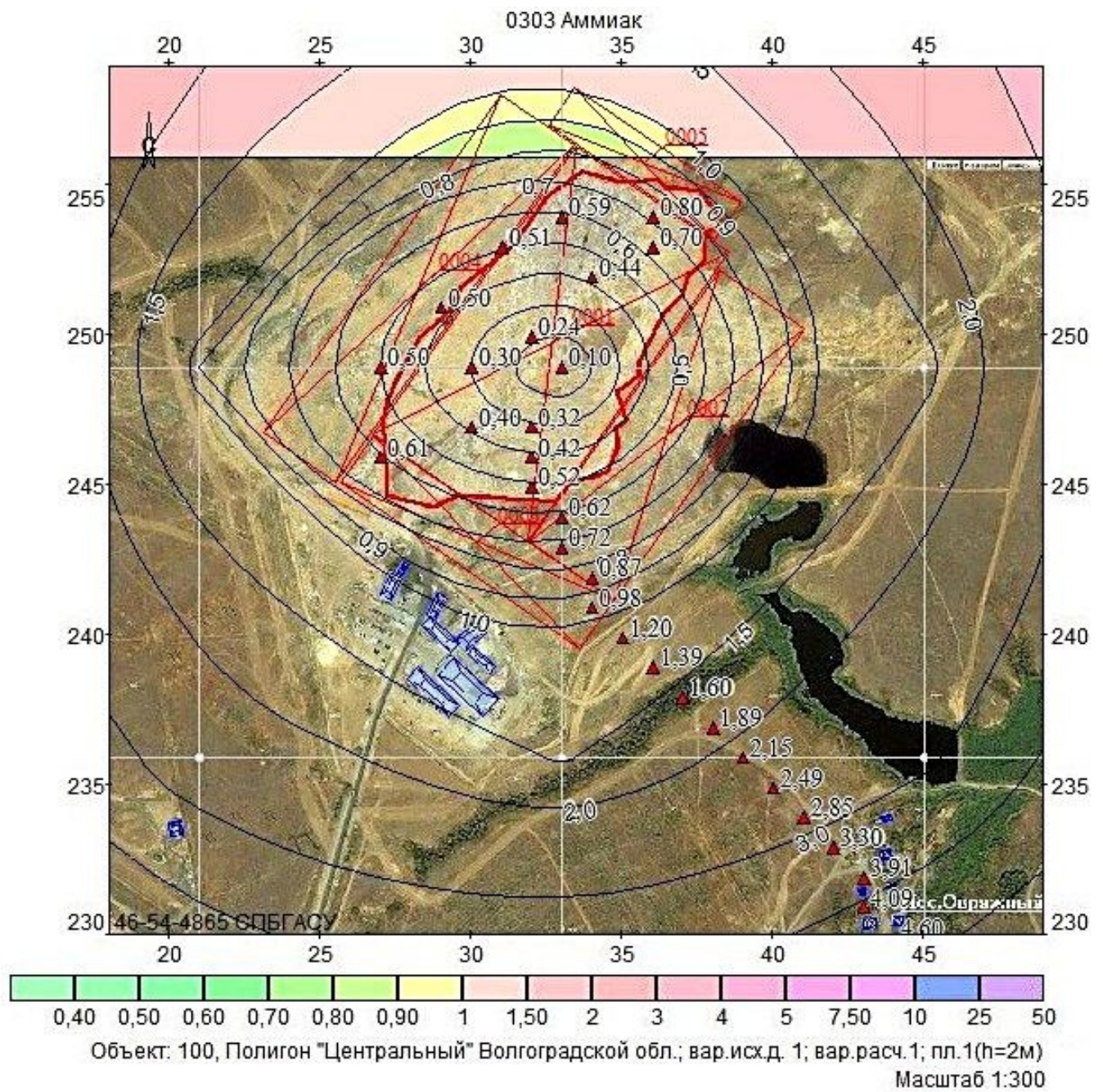
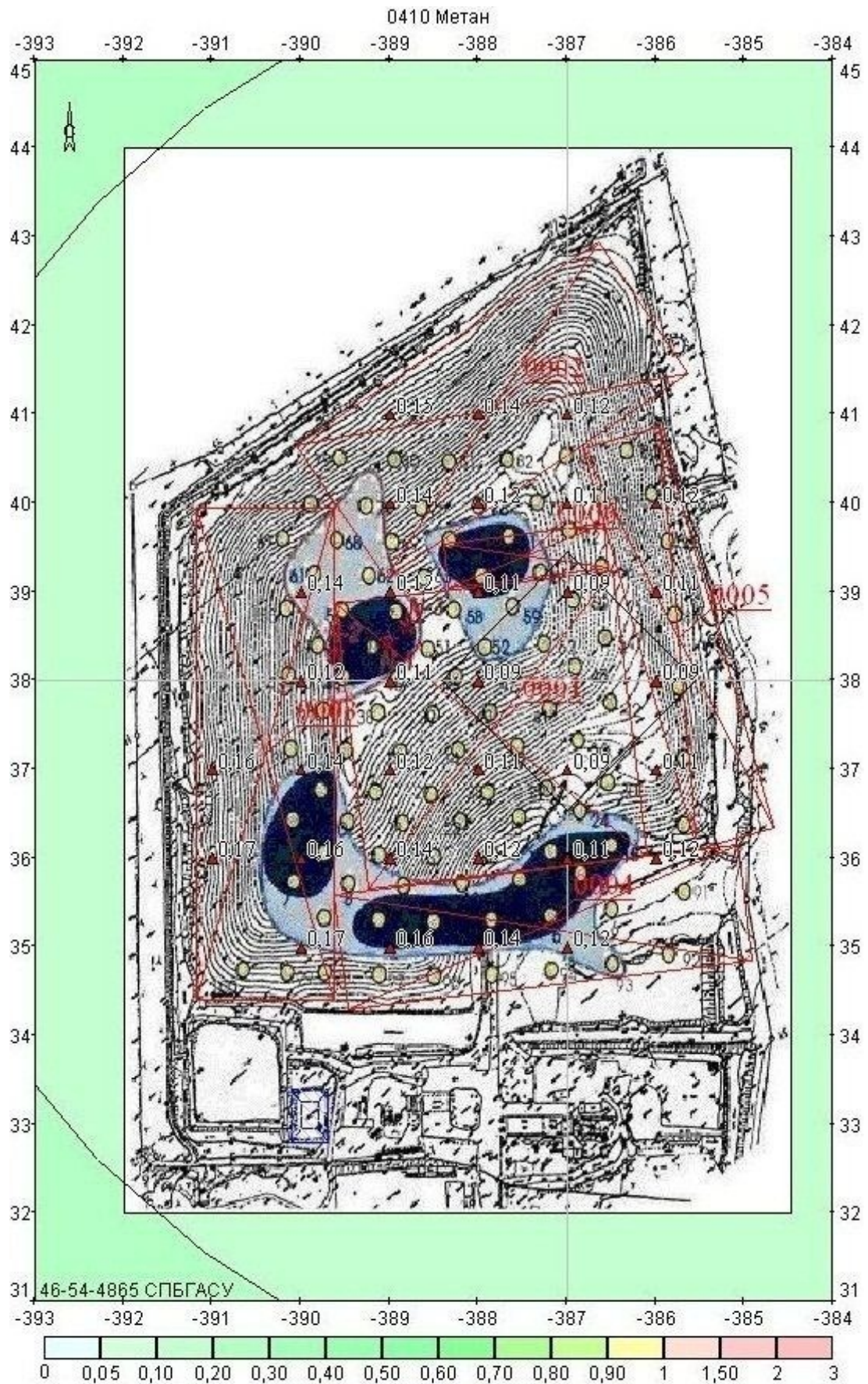


Рисунок П.4.3 – Поле концентраций аммиака в долях ПДК на полигоне «Центральный» Волгограда в 2006 г.



Объект: 101, Полигон ПТО-1 "Волхонский"; вар.исх.д. 1; вар.расч.1; пл.1(h=2м) Масштаб 1:89

Рисунок П.4.4 – Поле концентраций метана в долях ОБУВ на полигоне ПТО-1 «Волхонский»

31.08.2001

0100 Углекислый газ

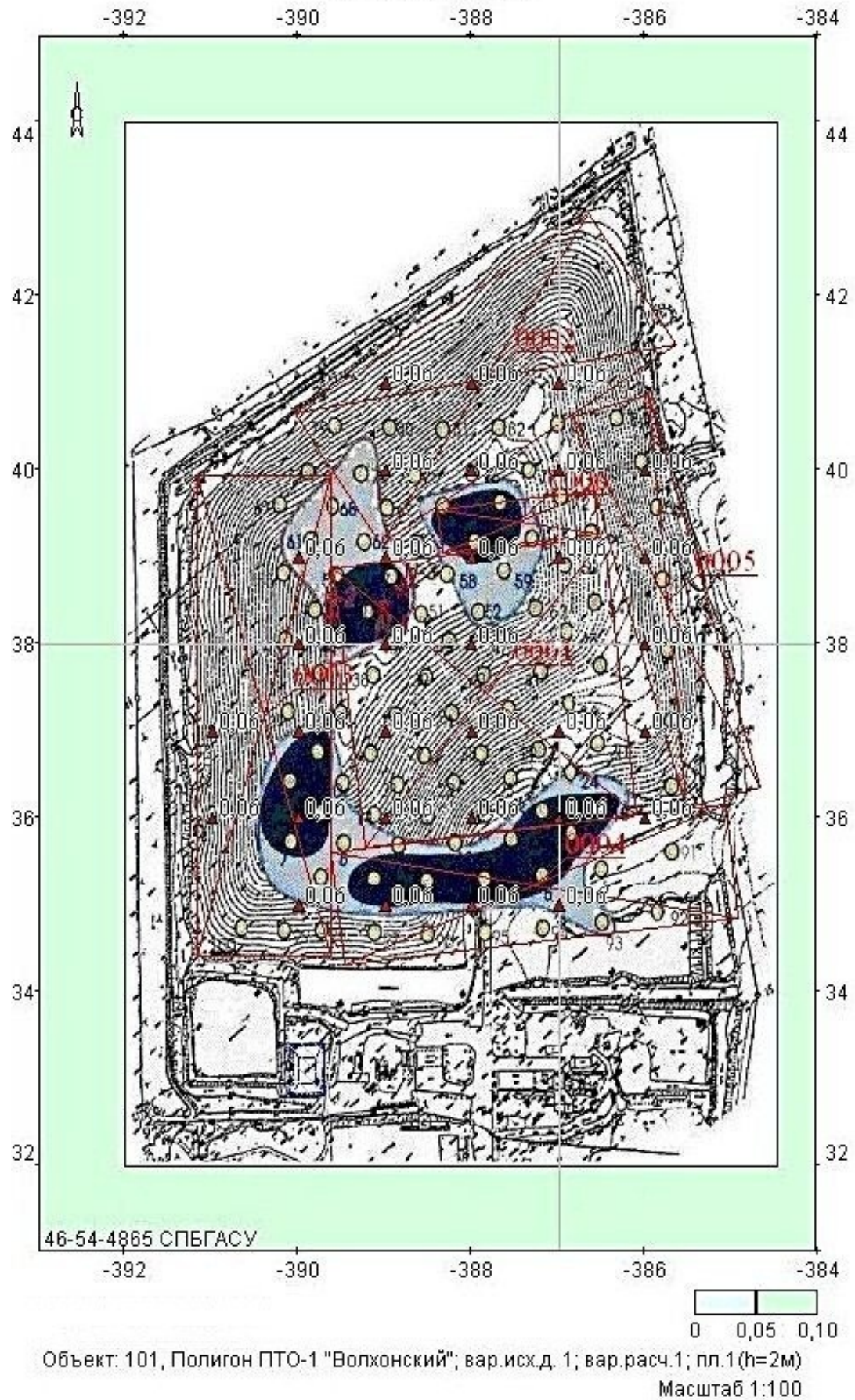
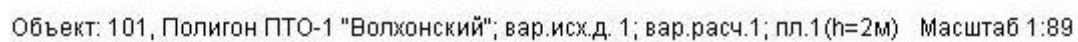


Рисунок П.4.5 – Поле концентраций углекислого газа в долях ПДК на полигоне ПТО-1 «Волхонский» 31.08.2001



24.09.2001

0100 Углекислый газ

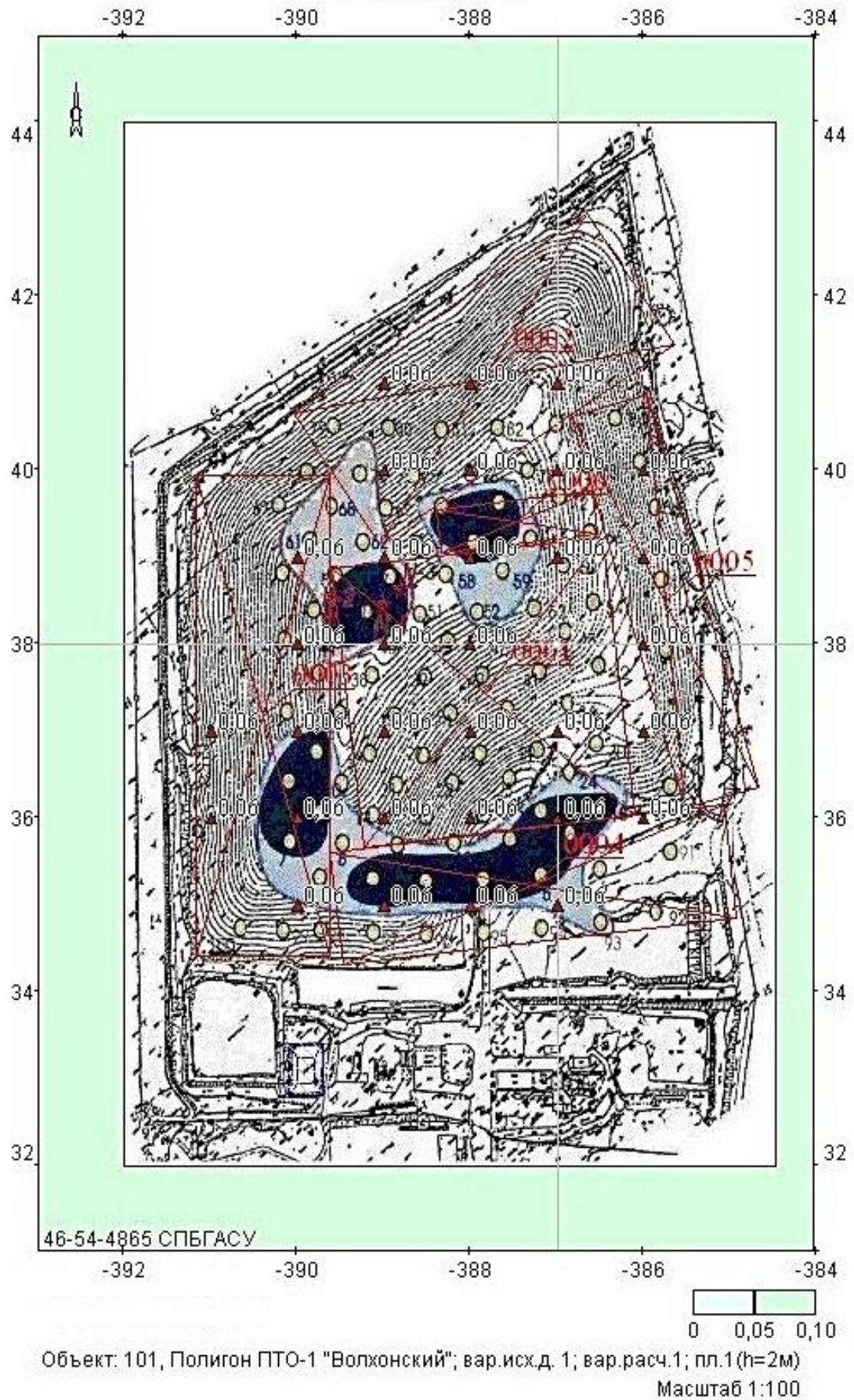


Рисунок П.4.7 – Поле концентраций углекислого газа в долях ПДК на полигоне ПТО-1 «Волхонский» 24.09.2001

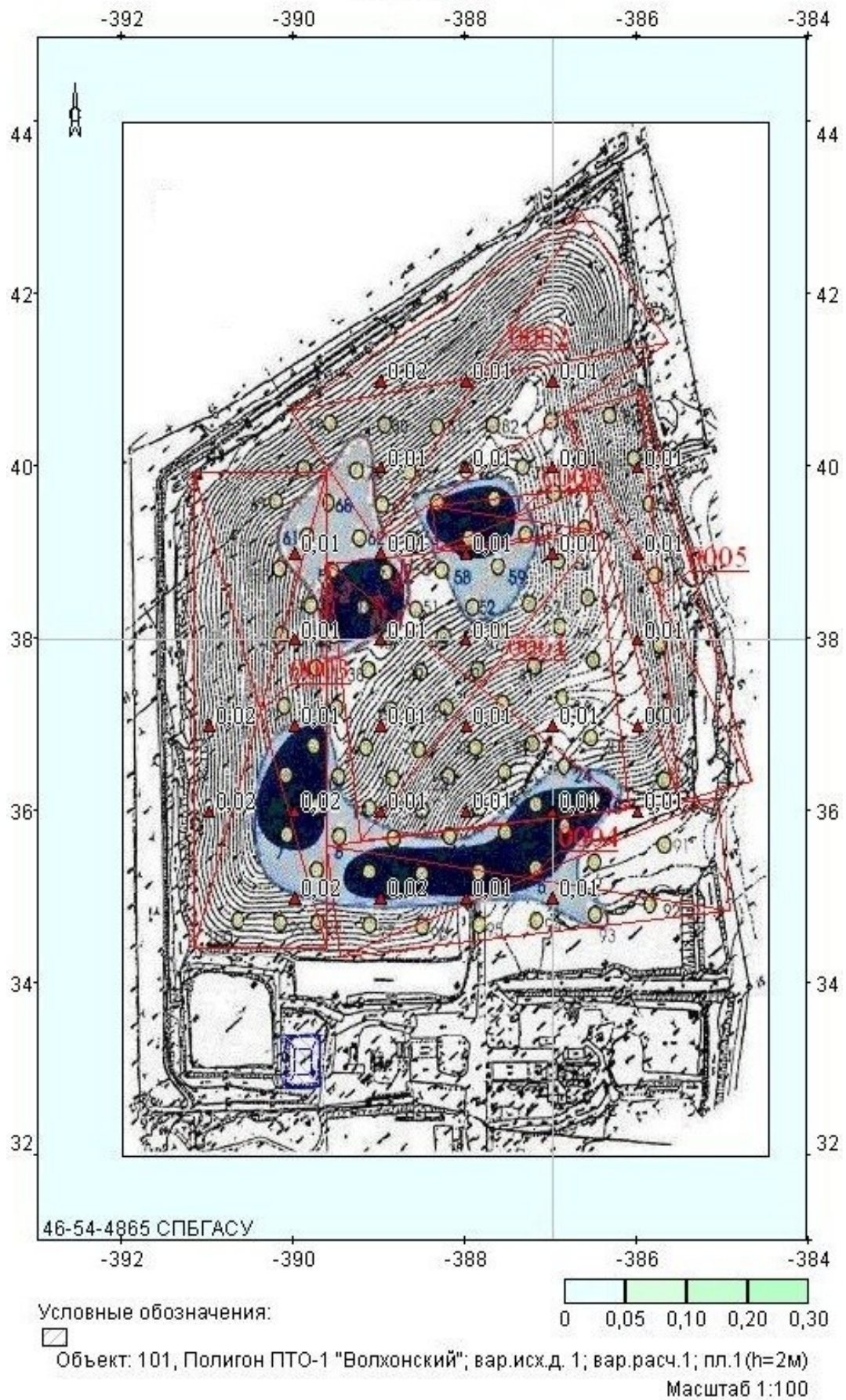


Рисунок П.4.8 – Поле концентраций бензола в долях ПДК на полигоне ПТО-1 «Волхонский»

24.09.2001

0616 Ксилол (смесь изомеров)

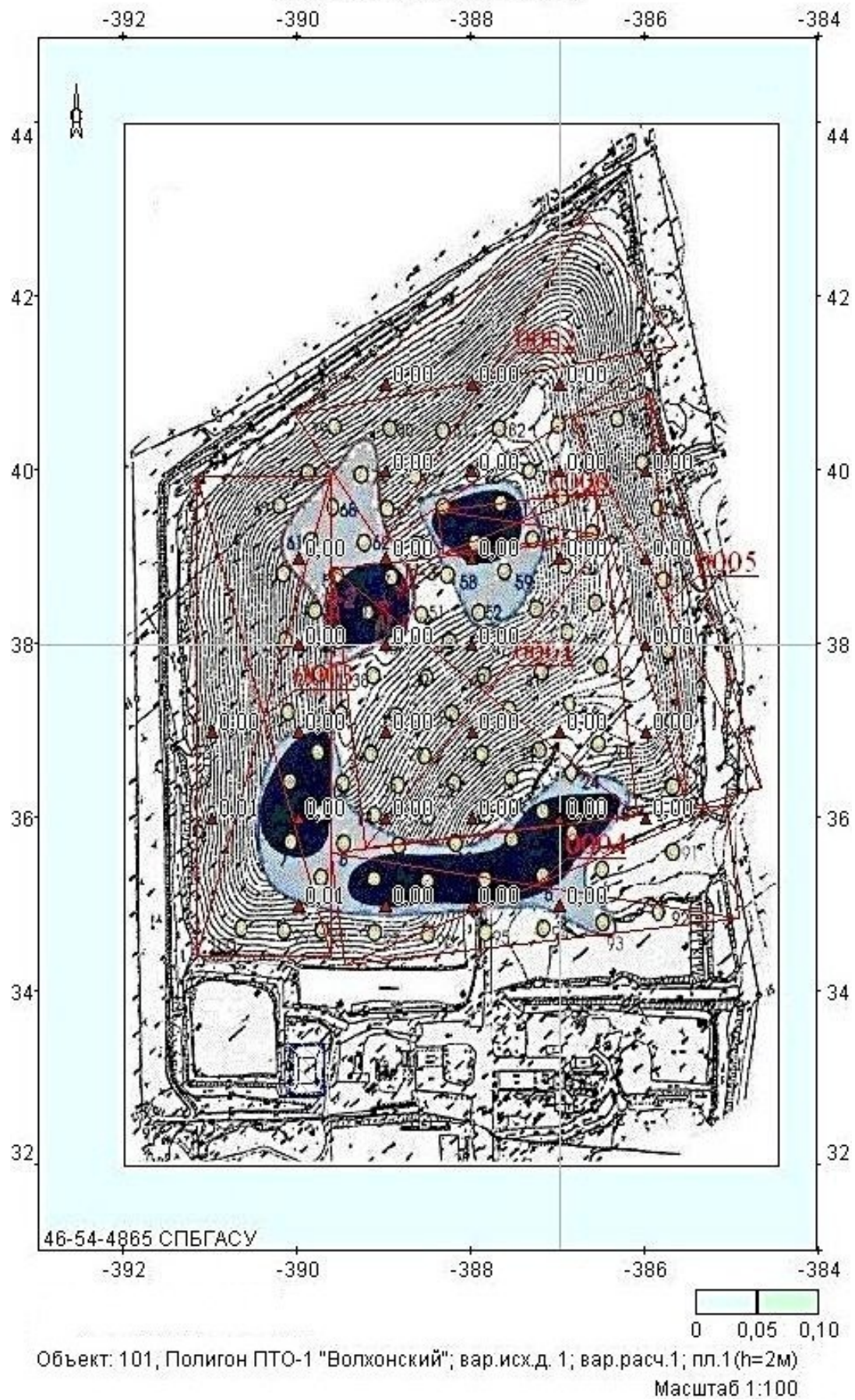


Рисунок П.4.9 – Поле концентраций ксилола в долях ПДК на полигоне ПТО-1 «Волхонский»

24.09.2001

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

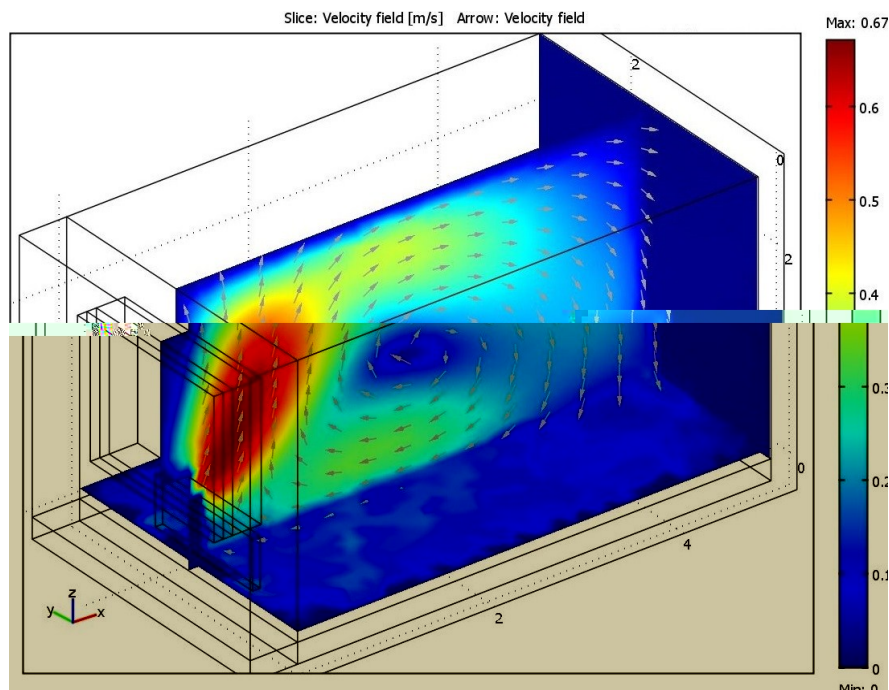


Рисунок П.5.1 – Поле среднесуточных скоростей движения воздуха, м/с, в комнате на 1-ом этаже многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» (окно ориентировано в сторону полигона ПТО-3, кратность воздухообмена $0,23 \text{ ч}^{-1}$)

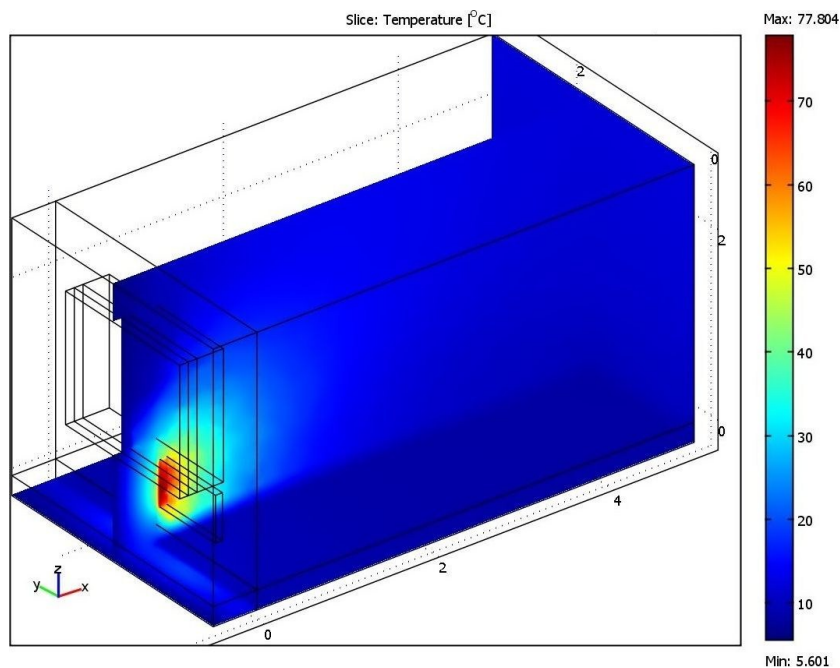


Рисунок П.5.2 – Поле температур воздуха, °C, в комнате на 1-ом этаже многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» 11.03.14, окно ориентировано в сторону полигона ПТО-3

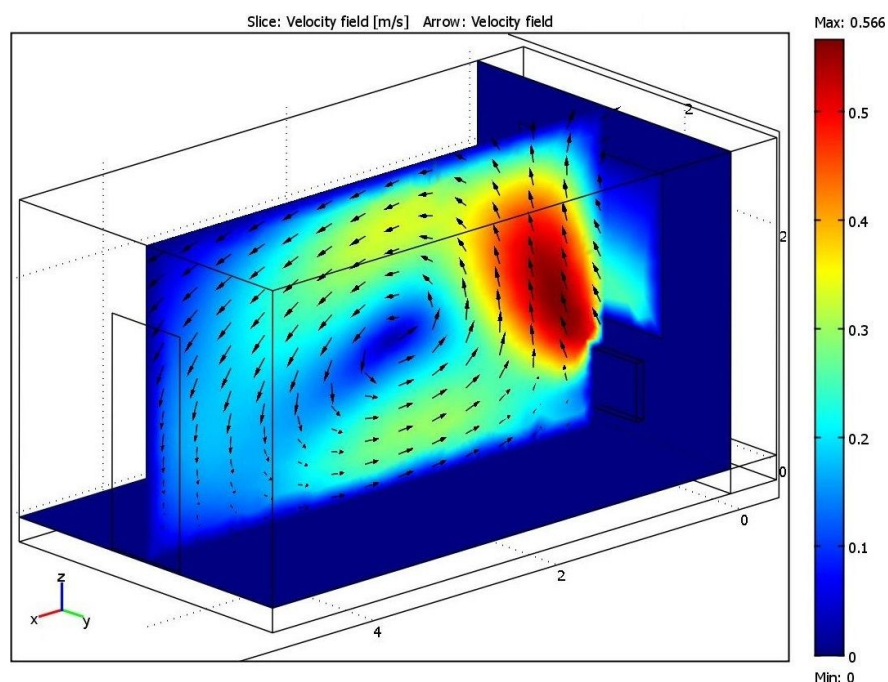


Рисунок П.5.3 – Поле среднесуточных скоростей движения воздуха, м/с, в комнате на 1-ом этаже многоквартирного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице», окно ориентировано противоположно полигону ПТО-3, кратность воздухообмена $0,12 \text{ ч}^{-1}$

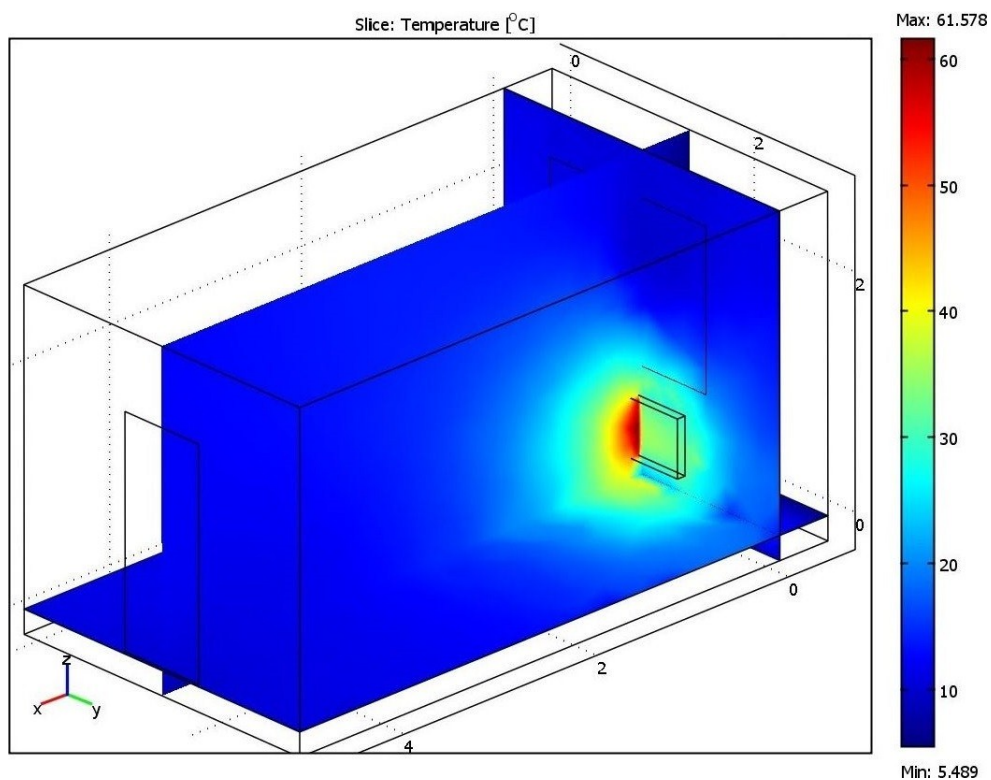


Рисунок П.5.4 – Поле температур воздуха, °C, в помещении ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» 11.03.14, окно ориентировано в сторону полигона ПТО-3

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Копии актов о внедрении материалов диссертационной работы

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»
(СПбГАСУ)
 2-я Красноармейская ул., 4, Санкт-Петербург, 190005. Тел: (812) 400-06-67. Факс: (812) 316-58-72. E-mail: rector @ spbgasu.ru
 ИНН 7809011023 / КПП 783901001, ОКПО 02068580, ОКВЭД 80.30.1

16.01.2013 № 08.13-02

На № _____ от _____

УТВЕРЖДАЮ
 Ректор ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»
 ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»
 к. т. н., доцент Зверев

А К Т

о практическом использовании научных результатов
 диссертации Сауца А.В. в учебном процессе СПбГАСУ

Мы, нижеподписавшиеся: заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» к.в.н. доцент Цаплин В.В, профессор кафедры «Безопасность жизнедеятельности» д.т.н. профессор Горохов В.Л. и доцент этой кафедры к. т. н. доцент Смирнова Е.Э. составили настоящий акт в том, что научные результаты диссертационной работы Сауца А.В.:

- методика расчёта эмиссии компонентов биогаза с полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов (ТБО и ПО);
- математическая модель рассивания биогаза с полигонов ТБО и ПО;
- уравнение для расчёта концентраций компонентов биогаза над поверхностью полигонов ТБО и ПО;
- методика определения размеров санитарно-защитных зон полигонов ТБО и ПО используются в учебном процессе на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» в лекционном курсе по дисциплине СД.10 «Системы защиты среды обитания» специальности 280101 «Безопасность жизнедеятельности в техносфере» с 2013 г.

Председатель
 к.в.н., доцент Цаплин В.В.

Члены комиссии:
 д. т. н., профессор Горохов В.Л.
 к.т.н., доцент Смирнова Е.Э.



ИНН/ КПП 7811495276/781101001 ОГРН 1117847253479
р/с 40702810237000005859 в филиал
ОПЕРУ ОАО БАНК ВТБ в С-Пб

ООО «Тэсла» www.teslamart.ru
Отдел продаж: (812) 448-80-35
(812) 448-80-25
Монтажный отдел: (812) 449-54-02
Бухгалтерия: (812) 449-73-82

192019, Санкт-Петербург,
Набережная Обводного канала,
д. 14, Бизнес-центр «Бизнес-Сити»

УТВЕРЖДАЮ:
Генеральный директор
ООО «Тэсла»
Бельский И. М.
«22» августа 2012 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов кандидатской диссертационной
работы Сауца Артура Валерьевича

Комиссия в составе: председатель Бельская А. Ю., члены комиссии: Полянский П. И., Петрасевич Г. В. составили настоящий акт о том, что результаты диссертационной работы «Моделирование рассеивания биогаза с полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук, использованы в проектно-конструкторской деятельности ООО «Тэсла» при разработке энергетических паспортов, составленных по результатам обязательного (добровольного) энергетического обследования, энергетических паспортов, составленных на основании проектной документации, а также рекомендаций (программ) по энергосбережению и повышению энергетической эффективности следующем виде:

1. Методика расчета (прогнозирования) потенциала энергосбережения и оценки возможной экономии энергетических ресурсов при использовании биогаза;
2. Рекомендации по оценке приемлемости использования биогаза в качестве вторичного энергетического ресурса, альтернативного (местного) топлива и возобновляемого источника энергии;
3. Оценка соблюдения санитарно-гигиенических и экологических требований (к атмосферному воздуху) при использовании энергоресурсов.

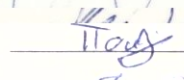
Использование указанных результатов позволяет повысить точность выполняемых расчётов, избежать затраты на проведение опытно-конструкторских работ и натурных испытаний (измерений) при проведении обследования. Результаты внедрялись при выполнении НИР и ОКР по темам:

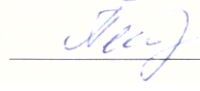
1. «Энергетическое обследование ООО «Лахденпохский фанерный комбинат «БУМЭКС»».

Председатель комиссии

Заместитель начальника монтажного отдела  Бельская А. Ю.

Члены комиссии:

Ведущий специалист по энергоаудиту  Полянский П. И.

Руководитель тендерного направления  Петрасевич Г. В.

Примечание: старое название темы диссертационной работы «Моделирование рассеивания биогаза с полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов», указанное в акте о внедрении, было заменено на «Обеспечение экологически безопасного воздушного режима зданий, расположенных вблизи полигонов твёрдых бытовых и промышленных отходов» в связи с расширением темы диссертационного исследования.