

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)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2014

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Дацюк Тамара Александровна

Официальные оппоненты: **Гульков Александр Нефёдович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВПО «Дальневосточный федеральный университет», кафедра нефтегазового дела и нефтехимии, заведующий, г. Владивосток;

Слесарев Михаил Юрьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВПО НИУ «Московский государственный строительный университет», кафедра строительства объектов тепловой и атомной энергетики, профессор

Ведущая организация: **ФГБОУ ВПО**
«Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Защита диссертации состоится «22» декабря 2014 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.06 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./Факс: (812) 316-58-72; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «_____» ноября 2014 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук,
доцент



Пухкал Виктор Алексеевич

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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) (А.М. Гонопольский и др., 2007). 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» (Т.К.Балахчина, 2012).

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 энергообеспечения.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам рассеивания вредных примесей в атмосфере вблизи зданий уделено внимание в работах Генриховича 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 ТБО и ПО;
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 п. 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, газотензитического 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 энергоэффективности 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 уравнивания 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 содержит 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.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, сформулированы цель и задачи, научная и практическая значимости.

В первой главе выполнен анализ существующих методик расчёта и результатов экспериментальных исследований эмиссии и рассеивания биогаза, систем сбора, очистки и утилизации биогаза, влияния полигонов ТБО и ПО на воздушный режим зданий, расположенных вблизи них.

Во второй главе предложены полуэмпирические зависимости на основе модели «LandGEM» с учётом известных в литературе методик расчёта и экспериментальных исследований, выполнен учёт характеристик полигонов ТБО и ПО как неоднородных объёмных источников выброса примеси в воздушную среду, предложена зависимость для оценки газотеплоэнергетического потенциала полигонов ТБО и ПО в эквиваленте тыс. м³ природного газа, предложены зависимости для расчёта характеристик газодренажных скважин.

В третьей главе приведены результаты натурного исследования температуры биогаза на поверхности полигонов ТБО и ПО, загрязнения биогазом воздуха вблизи и внутри зданий, расположенных в зоне влияния полигонов ТБО и ПО.

В четвертой главе разработаны, программно реализованы в среде «Comsol Multiphysics» и верифицированы методики расчёта загрязнения биогазом воз-

духа вблизи и внутри зданий, расположенных вблизи полигонов ТБО и ПО. Установлено, что разработанная методика для расчёта загрязнения наружного воздуха на расстояниях менее 500 м от полигонов даёт результаты более близкие к экспериментальным, чем при расчете по ОНД-86.

В пятой главе выполнено усовершенствование системы сбора, очистки и утилизации биогаза путём последовательного использования центробежной сепарации, реагентов моноэтаноламина, оксида железа (III) и цеолитов для повышения его качества как энергоресурса и снижения его выбросов в атмосферу.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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

Для расчёта количества биогаза, выбрасываемого полигоном ТБО и ПО, на базе модели «**LandGEM**» (EPA, 2005) автором было предложено следующее полуэмпирическое уравнение:

$$m_l = 0,1\xi k \frac{c_{\text{комп}} Q_w}{1 - e^{-kT}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 M_i e^{-kt_{ij}}; \quad (1)$$

где m_l – эмиссия l -го компонента биогаза, т/год; ξ – доля утилизации биогаза, при полном отсутствии которой $\xi = 1$, при её наличии $\xi = 0$; $c_{\text{комп}}$ – массовая концентрация компонента в биогазе при его образовании; M_i – масса отходов, т; t_{ij} – время эксплуатации полигона, лет; i – порядковый номер года; j – номер шага по времени (время эксплуатации полигона в пределах каждого года заменяется дискретным аналогом с шагом 0,1 года); n – общее количество прошедших лет; k – коэффициент скорости разложения отходов, год⁻¹; для влажной среды $k = 0,7$; для нейтральной $k = 0,04-0,05$; для сухой $k = 0,02$ (EPA, 2005); Q_w – удельный выход биогаза по массе за период активной стабилизированной генерации при метановом брожении влажных отходов; T – период полного сбраживания быстро разлагающейся органической части отходов, лет. Значения Q_w , T определяются на опыте или по методике ОАО «АКХ им. К.Д. Памфилова» (2004).

Для метана уравнение (1) было дополнено коэффициентами из методики **MUFG (2008)**, учитывающими условия протекания аэробных и анаэробных процессов в теле полигона ТБО и ПО:

$$m_{CH_4} = 0,1c_{CH_4} k f \xi Q_w \frac{1 - OX}{1 - e^{-kT}} \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 M_i e^{-kt_{ij}}; \quad (2)$$

где c_{CH_4} – массовая доля метана в биогазе; f – коэффициент условий эксплуатации полигона: в полуанаэробных санкционированных полигонах, имеющих

проницаемый покрывающий слой, систему дрен, дегазацию $f = 0,5$; для несанкционированных 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 $f = 0,4$; OX – коэффициент, зависящий от слоя изоляции: для управляемых полигонов с использованием грунта $OX = 0,1$; для остальных $OX = 0$ (МУФГ, 2008).

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

$$V_{\text{прир.газа}} = \chi m_{CH_4} k_{\text{сж.газа}} / k_{\text{прир.газа}}; \quad (3)$$

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

Некоторые полигоны оснащены газодренажными скважинами. Скважины позволяют выровнять наружное и внутреннее давление, выполнить сбор и точно сосредоточить выброс биогаза. Считая, что давление на поверхности полигона практически не отличается от атмосферного, произведение площади сечения $S_{\text{скв}}$, м², и числа скважин $n_{\text{скв}}$ можно найти как:

$$n_{\text{скв}} S_{\text{скв}} = k_{\text{перев}} T_{\text{биогаза}} \sum_{l=1}^N m_l R_l / (T_{\text{тёпл}} p_{\text{атм}} g_{\text{биогаза}}); \quad (4)$$

где $k_{\text{перев}} = 11574,07$ – коэффициент перевода единицы измерения т/год в мг/с.; $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, Па; $g_{\text{биогаза}} = 0,1$ м/с. – максимально допустимая скорость движения биогаза в скважинах; R_l – газовая постоянная l -го компонента, Дж/(кг·К·моль); N – количество компонентов биогаза, по которым ведётся расчёт; T – температура биогаза, К; $T_{\text{тёпл}}$ – длительность тёплого периода года, дней, в пределах которого температура воздуха выше 0°C.

Удельная масса компонента биогаза $m_{l\text{скв}}$, мг/с., выделяемая из каждой скважины, определяется как:

$$m_{l\text{скв}} = k_{\text{перев}} m_l p_{\text{атм}} g_{\text{биогаза}} S_{\text{скв}} / (T_{\text{тёпл}} T_{\text{биогаза}} \sum_{l=1}^N m_l R_l). \quad (5)$$

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.

При наличии на полигоне газодренажных скважин учёт эмиссии биогаза можно выполнить с помощью уравнения (5). При их отсутствии необходимо учитывать неоднородность эмиссии по высоте и площади полигона. Полигоны, как правило, имеют расчётную схему «Усечённая пирамида», которая разбивается на множество бесконечно малых участков, и задается система координат

хуз с началом посередине основания полигона (рис. 1). Если полигон разбит на группу участков (карт) захоронения, начатых использоваться в разное время, то каждый из них по данной схеме разбивается отдельно.

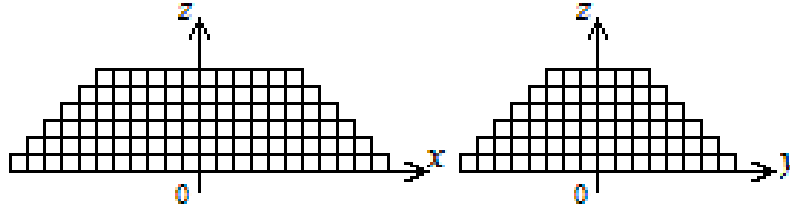


Рис. 1. Схема разбивки поверхности полигона ТБО и ПО на группу участков

Для нахождения удельной эмиссии компонента биогаза на бесконечно малом участке полигонов $m_{\text{луч}}$, мг/(м²·сек), считая, что в теле полигона происходит гомогенизация среды, было выведено приближённое уравнение:

$$m_{\text{луч}} \approx k_{\text{перев}} m_l Z / (T_{\text{тёпл}} V_{\text{пол}}); \quad (6)$$

где Z – глубина залегания отходов (высота полигона), м; $V_{\text{пол}}$ – объём, занимаемый полигоном, м³.

При наличии на поверхности полигона грунтовой изоляционной засыпки и одновременном отсутствии газодренажных скважин учёт эмиссии производится с помощью уравнения:

$$C_{\text{пов,возд}} = \frac{T_{\text{тёпл}} D n_{\text{отх}} c_{\text{комп}} V_{\text{пол}} + k_{\text{перев}} m_{\text{комп}} Z h}{T_{\text{тёпл}} V_{\text{пол}} (D + \gamma h)}; \quad (7)$$

где D – диффузивность грунтовой засыпки (изолирующей снаружи отходы), м²/с; h – толщина грунтовой засыпки, м; $n_{\text{отх}} = 0,33$ – пористость отходов; $\gamma = 0,001-0,0015$ м/с – коэффициент просачивания; $c_{\text{пов}}$ – концентрация l -го компонента биогаза на верхней границе засыпки со стороны воздуха, мг/м³.

С помощью тепловизионной съёмки ряда полигонов было установлено, что выброс биогаза является «холодным», что можно выразить как:

$$T_{\text{ф}} \approx T_{\text{биогаза}}; \quad (8)$$

где $T_{\text{биогаза}}$ и $T_{\text{ф}}$ – соответственно температура биогаза и фоновая, К.

Основываясь на приближении (8) в дальнейшем можно не учитывать температурный фактор при рассеивании в атмосфере и сборе биогаза.

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.

Расчёт рассеивания пассивной примеси концентрацией C , мг/м³, выполняется с помощью дифференциальным уравнением (ДУ) турбулентной диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla(C\vec{V} - k_{xyz} \nabla C) - \frac{\partial(\vec{w}_s C)}{\partial z} = I(\vec{r}; t); \quad (9)$$

где t – время (фиктивное), с.; $\vec{V} = \vec{V}(u; v; w)$ – вектор скорости движения возду-

ха, м/с; $I(\vec{r};t)$ – функция эмиссии, мг/(м²·с.); $k_{xyz} = \text{diag}\{k_x; k_y; k_z\}$ – коэффициент турбулентной вязкости, м²/с.; $\vec{w}_s$ – скорость оседания примеси, м/с.

На входной границе наружной подобласти профиль скорости ветра задаётся уравнением Кармана:

$$\begin{cases} u = u^* \ln[(z - H_{\text{ср}} + z_0 / C) / z_0] \cos \alpha / \zeta \\ v = u^* \ln[(z - H_{\text{ср}} + z_0 / C) / z_0] \sin \alpha / \zeta \\ w = 0 \end{cases} ; \quad (10)$$

где u^* – динамическая скорость ветра, м/с; $H_{\text{ср}}$ – средняя высота ветровых преград, м; z_0 – параметр шероховатости, м; $\zeta = 0,4$ – коэффициент Кармана; C – коэффициент сопротивления, м; α – угол между направлением ветра на входной в расчётную область границе и осью x , рад.

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

$$\begin{cases} \rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla [\eta (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \rho_0 \vec{g} [\beta_T (T - T_0) - 1] \\ \nabla \vec{V} = 0 \end{cases} ; \quad (11)$$

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; $\vec{g} = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения.

В данном случае приближение Буссинеска применимо, т.к. отношение числа Рэлея Ra к параметру Буссинеска $\beta_T (T_0 - T)$ для данного типа задач значительно больше единицы (В.В. Пухначев, 1994):

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

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

Постановка задачи принята стационарной, её решение производится с использованием метода установления.

Турбулентная вязкость определяется с помощью подсеточной модели Смагоринского, используемой для больших расчётных областей. Коэффициенты турбулентной вязкости определяются как:

$$\begin{cases} k_x = k_y = \Delta x \Delta y k_{\text{баз}} / \Delta^2 \\ k_z = k_{\text{баз}} \Delta z^2 / \Delta^2 \end{cases} ; \quad (13)$$

где Δ – подсеточный масштаб, м; $k_{\text{баз}}$ – базовый коэффициент турбулентной вязкости, м²/с, определяется как:

$$k_{\text{баз}} = \begin{cases} k_{\phi} + \varepsilon \Delta^2 |Def| \sqrt{1 - Ri} / \sqrt{2}, & Ri < 1 \\ k_{\phi}, & Ri \geq 1 \end{cases}; \quad (14)$$

Масштаб Δ для прямоугольных ячеек размерами Δx , Δy , Δz при умеренной анизотропии сетки определяется как:

$$\Delta = \sqrt[3]{\Delta x \Delta y \Delta z}; \quad (15)$$

при сильной анизотропии сетки:

$$\Delta = \max\{\Delta x; \Delta y; \Delta z\}. \quad (16)$$

где $k_{\phi} = 1-15 \text{ м}^2/\text{с}$ – фоновый коэффициент турбулентной вязкости; $\varepsilon = 0,1-0,4$ – константа Смагоринского; Def – функция диссипации или деформации:

$$Def = \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right)^2 \right]}; \quad (17)$$

Ri – локальное число Ричардсона, определяемое уравнением:

$$Ri = g \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{T}{T_{\phi}} + [\gamma_{\phi}(z) - \gamma_a] \right) / [Def]^2; \quad (18)$$

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

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

Программная реализация модели произведена в Comsol Multiphysics, реализующего метод конечных элементов. Автором диссертации на языке Matlab/Comsol Script™ был написан скрипт, являющийся альтернативой программному модулю. Скрипт предназначен для расчётов турбулентной вязкости с использованием модели Смагоринского и параметров граничных условий.

Для упрощения расчёта масштаба ячейки в скрипте подкоренное произведение $\Delta x \Delta y \Delta z$ в определении (15) 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 тетраэдрических ячеек. Масштаб Δ ячейки в форме правильного тетраэдра объёмом Ω можно найти как:

$$\Delta = \sqrt[3]{\Omega} = \sqrt[3]{a^3 \sqrt{2} / 12} = a \sqrt[3]{\sqrt{2} / 12}; \quad (19)$$

где a – размер ребра тетраэдрической ячейки, м.

Для расчётных областей с реальной геометрией построить изотропную сетку трудно. Поэтому по аналогии с (16) физически более правильно ограничиться учётом максимального размера ребра ячейки:

$$k_{xyz} = 2 \sqrt[3]{9} k_{\phi} + \varepsilon a_{\text{max}}^2 |Def| / \sqrt{2}; \quad (20)$$

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

Выражение (20) 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 построения сетки следует придерживаться следующих правил:

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.

Экспериментально подобраны $a_{\max} = 4$ м, $\varepsilon = 0,2$ и $k_{\phi} = 4$ м²/с. Чтобы в пределах конечного элемента $k_{xyz} = \text{const}$ можно использовать Лагранжевы конечные элементы с линейной аппроксимацией. Тогда внутри каждого элемента производные компонентов скорости u , v и w по осям координат будут константами, тогда $Def = \text{const}$ и $k_{xyz} = \text{const}$.

Для расчёта полей скорости и давления ветра непосредственно вблизи зданий модель турбулентности Смагоринского непригодна. Вблизи зданий внутри расчётной области создаются дополнительные подобласти, где измельчается конечно-элементная сетка (рис. 2), а для расчётов используется модель « k - ε »:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_0 \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} = \nabla [(\eta + \eta_t)(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - p] + \vec{F} \\ \nabla \vec{V} = 0 \\ \rho_0 \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_0 \vec{V} \nabla k - \nabla [(\eta + \eta_t / \sigma_k) \nabla k] = 0,5 \eta_t (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)^2 - \rho_0 \varepsilon \\ \rho_0 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_0 \vec{V} \nabla \varepsilon = \nabla [(\eta + \eta_t / \sigma_\varepsilon) \nabla \varepsilon] = 0,5 C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_t (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T)^2 - \rho_0 C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \eta_t = \rho_0 C_\mu k^2 / \varepsilon \end{array} \right. ; \quad (21)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ε – скорость диссипации турбулентности; $C_\eta = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$; $\vec{F} = -\rho_0 \vec{g}$.

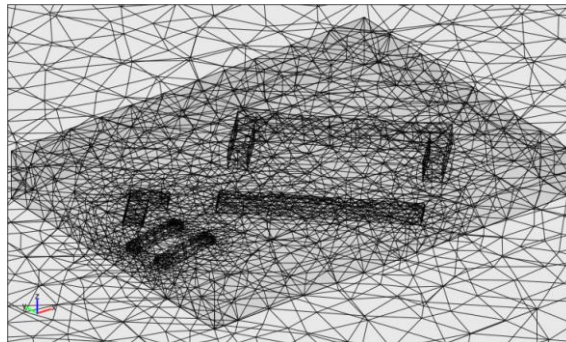


Рис. 2. Пример построения расчётной подобласти и конечно-элементной сетки для ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице»

Кинематическая турбулентная вязкость, определяется как:

$$k_{xyz} = \eta_t / \rho_0. \quad (22)$$

Пример результатов расчётов для полигонов «Центральный» Волгограда и ПТО-3 «Новосёлки» приведены на рис. 3 и 4.

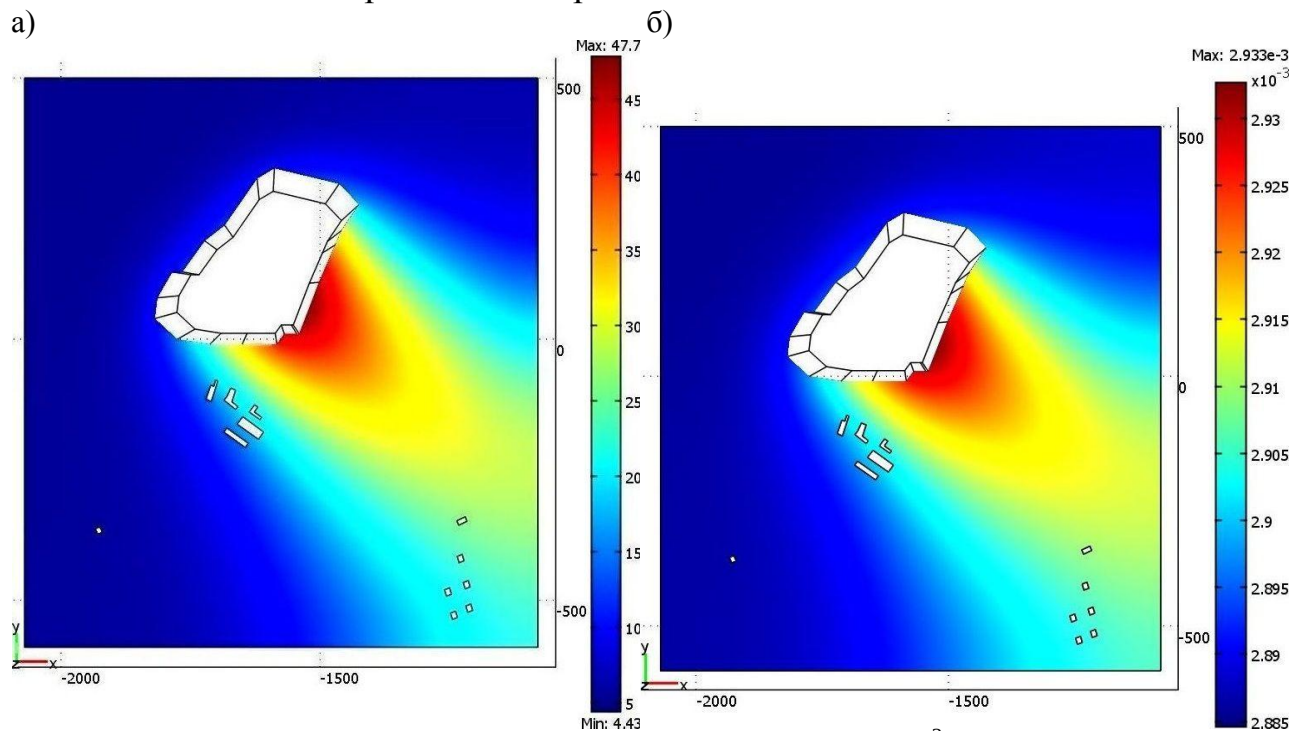


Рис. 3. Поле среднегодовых приземных концентраций, $\text{мг}/\text{м}^3$, вблизи полигона «Центральный» в 2007 г.: а) метана; б) сероводорода

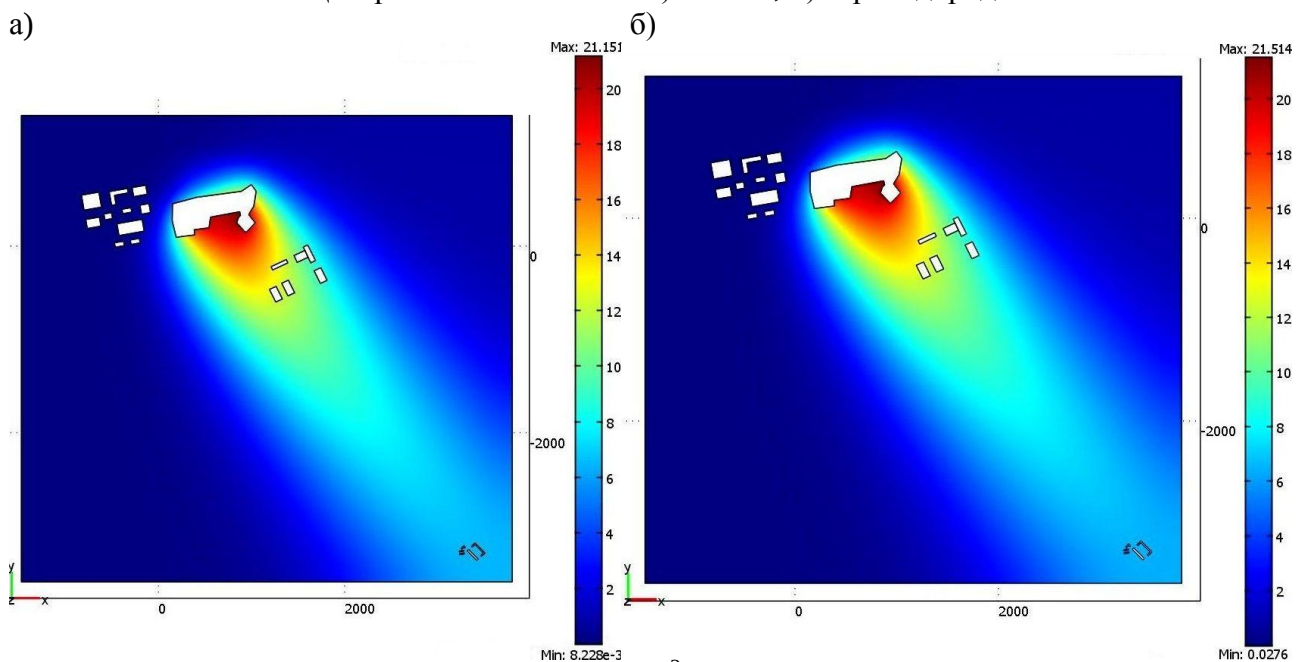


Рис. 4. Поле приземных концентраций, $\text{мг}/\text{м}^3$, в районе полигона ПТО-3 «Новосёлки» 11.03.14: а) аммиака; б) бензола

Для сравнения также выполнены расчёты по ОНД-86. Т.к. она не предназначена для расчётов неоднородных объёмных источников, то полигоны разбивались на группу площадных источников. Сравнение расчётных и экспериментальных значений приведено в табл. 1 и 2. Анализируя результаты, можно прийти к выводу, что по мере приближения к полигону разработанная методика

даёт результаты более близкие к экспериментальным, чем ОНД-86.

Таблица 1

Значения среднегодовых концентраций компонентов биогаза вблизи полигона «Центральный», полученных различными способами

Компонент, контрольная точка, год	Значения концентраций, мг/м ³		
	Экспериментальное (Г.А. Бобунова, 2010)*	Расчётное по	
		Разработанной методике	ОНД-86
Метан, здания АХЗ в 10 м от полигона	57,8-86,6	46,93	5,63
Метан, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный	17,0-25,4	27,58	17,66
Метан, центр пос. Овражный	18,0-27,0	24,76	23,66
Сероводород, СЗЗ, 50 м до пос. Овражный	0,003-0,005	0,005	0,001
Сероводород, центр 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

Таблица 2

Значения разовых приземных концентраций компонентов биогаза вблизи полигона ПТО-3 «Новосёлки», мг/м³, полученных различными способами

Вещество	Значения концентраций, мг/м ³ , вблизи					
	Складских зданий завода «Nissan» (500 м от полигона)			ЖК «Дом на Нижне-Каменной улице» (5,06 км от полигона)		
	Экспериментальное*	Расчётное по		Экспериментальное*	Расчётное по	
		Разработанной методике	ОНД-86		Разработанной методике	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 газоанализатором УГ-2 с точностью до 25%

Результаты расчётов поля скорости, давления ветра приведены на рис. 5 а-г.

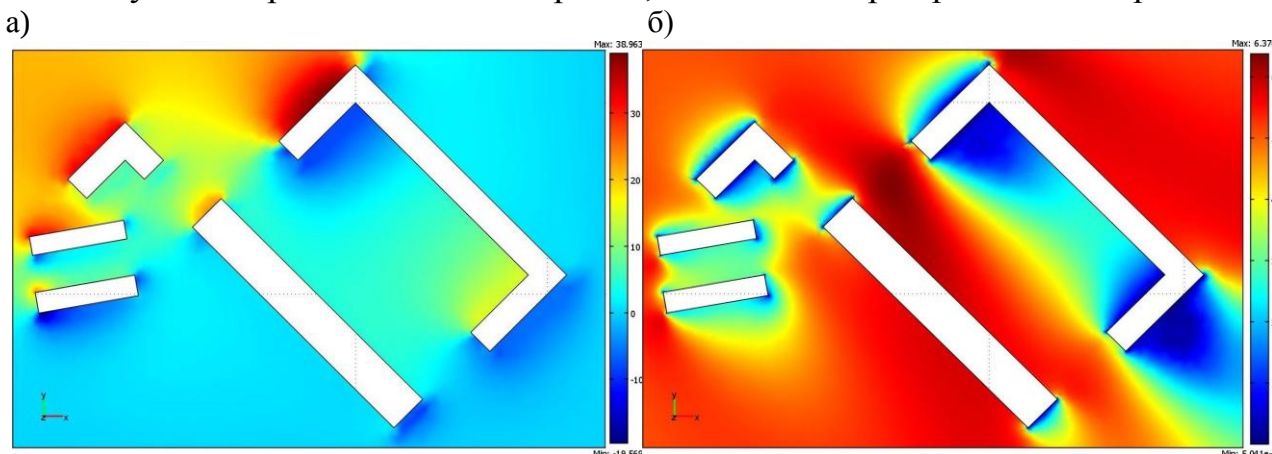


Рис. 5. Поля вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменной улице» 11.03.14: а) давления ветра, Па; б) скорости ветра, м/с

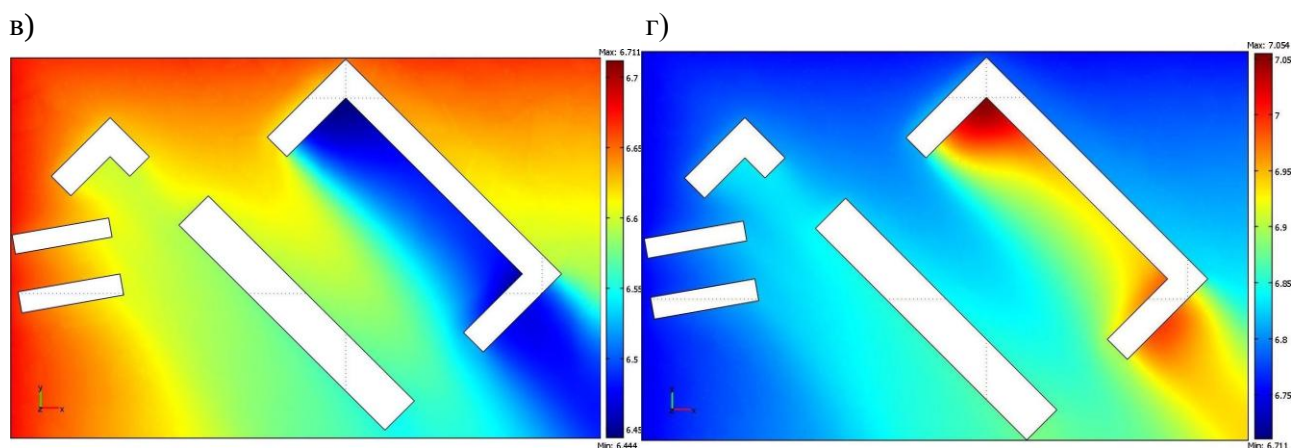


Рис. 5. Поля вблизи ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице» 11.03.14: в) приземных концентраций аммиака, мг/м^3 ; г) приземных концентраций бензола, мг/м^3

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

Разработанная методика применялась для расчётов ПДВ, метеорологических коэффициентов разбавления для аммиака, бензола и размеры СЗЗ полигона ПТО-3 в 2014 г. в условиях прилегающей застройки (табл. 3).

Таблица 3

Расчётные ПДВ, метеорологические коэффициенты разбавления и 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»)	Доля ПДК _{ср.сут}	375,20	142,11
	ПДВ, т/год	34,72	138,84
	$K_{\text{разб}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$8,55 \cdot 10^4$	$8,18 \cdot 10^4$
3 км (граница минимально допустимой СЗЗ полигона ПО)	Доля ПДК _{ср.сут}	212,53	83,11
	ПДВ, т/год	61,29	237,41
	$K_{\text{разб}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$1,49 \cdot 10^5$	$1,38 \cdot 10^5$
5,06 км (вблизи ЖК «Дом на Нижнекаменской улице»)	Доля ПДК _{ср.сут}	170,1	67,84
	ПДВ, т/год	76,58	290,84
	$K_{\text{разб}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	$1,88 \cdot 10^5$	$1,69 \cdot 10^5$

* ПДК среднесуточная 0,04 мг/м^3 ; ** ПДК среднесуточная 0,1 мг/м^3

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

Для расчёта концентраций примеси в помещении и скорости движения воздуха используются ДУ (9) и (11), приведённые выше. Для внутренней среды, предлагается использовать упрощённую алгебраическую модель турбулентности, решая систему ДУ Навье-Стокса без осреднения по Рейнольдсу. Кинематическая турбулентная вязкость принимается $k_{xyz} = 1 \text{ м}^2/\text{с}$.

Поле температур в здании рассчитывается по ДУ теплопроводности:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) + \rho C_p \vec{V} \nabla T = Q_{heat}; \quad (23)$$

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.

Эмиссию примеси, проникающей в помещение за счёт воздухопроницаемости ограждающей конструкции, I_i , мг/сек, можно найти как:

$$I_i = \Psi c_{\text{прист}} \Delta p / (\rho_n R_u); \quad (24)$$

где Ψ – отношение среднесуточной концентрации к разовой (Е.И.Теверовский, И.А.Терновский, 1988); $c_{\text{прист}}$ – «пристеночная» разовая концентрация примеси снаружи здания, мг/м³; Δp – разность давлений воздуха на наружной и внутренней поверхностях ОК, Па; ρ_n – плотность наружного воздуха, кг/м³; R_u – сопротивление воздухопроницанию ОК, кг/(м²·с).

Для компонент скорости движения воздуха на входной границе в помещении задаётся начальное условие:

$$V_i = \Delta p / \rho_n R_u. \quad (25)$$

Если приток воздуха происходит через окно или вентиляционный клапан, то задаётся граничное условие для концентрации примеси:

$$c = \Psi c_{\text{прист}}. \quad (26)$$

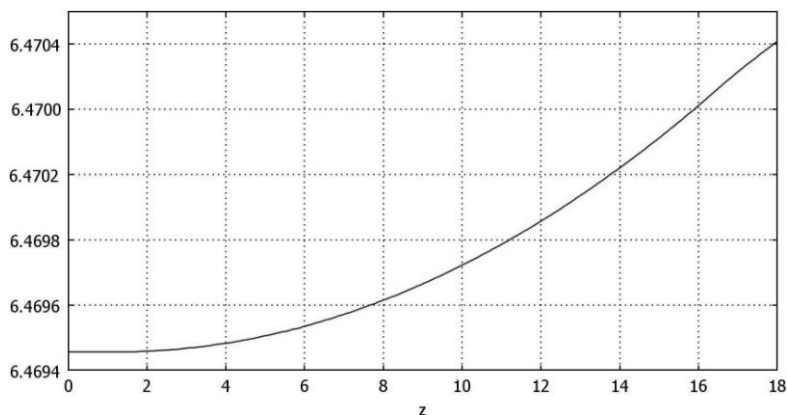
Методика программно реализована для наиболее неблагоприятных условий в комнатах на 1-ом этаже]-образного дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице». Расположения окон в комнатах отмечены точками 1 и 2 на рис. 6.



Рис. 6. Схема расположения окон исследуемых комнат: 1 – окно выходит в сторону полигона; 2 – окно выходит в сторону, противоположную полигон

На рис. 7 видно, что «пристеночные» концентрации практически не меняются по высоте здания. Тогда при расчете загрязнения внутреннего воздуха профиль концентрации в наружном воздухе можно не учитывать.

а)



б)

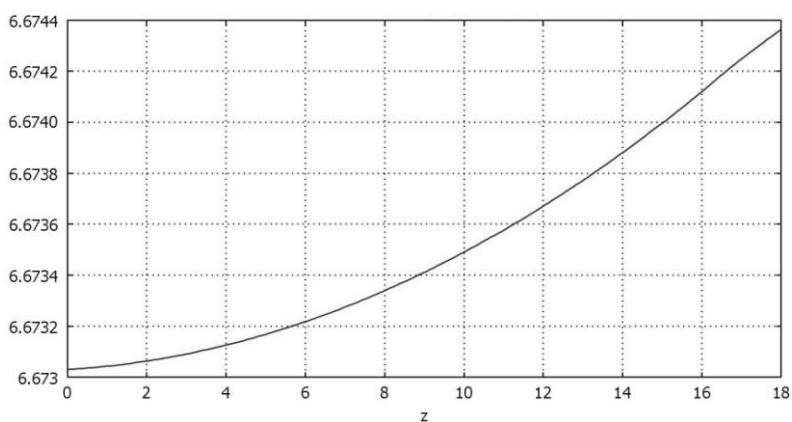
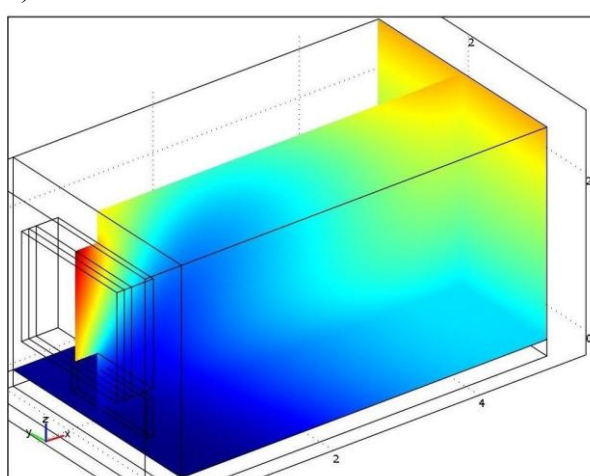


Рис. 7. Профиль разовых «пристеночных» концентраций, мг/м^3 , 11.03.14 по высоте здания: а) аммиака в районе точки 1; б) бензола в районе точки 2

На рис. 8-9 приведены результаты расчётов загрязнения аммиаком и бензолом воздуха в двух комнатах на 1-ом этаже дома ЖК «Дом на Нижне-Каменской улице». Окно комнаты №1 ориентировано в сторону полигона ПТО-3, комнаты №2 – в сторону, противоположную тому же полигону.

а)



б)

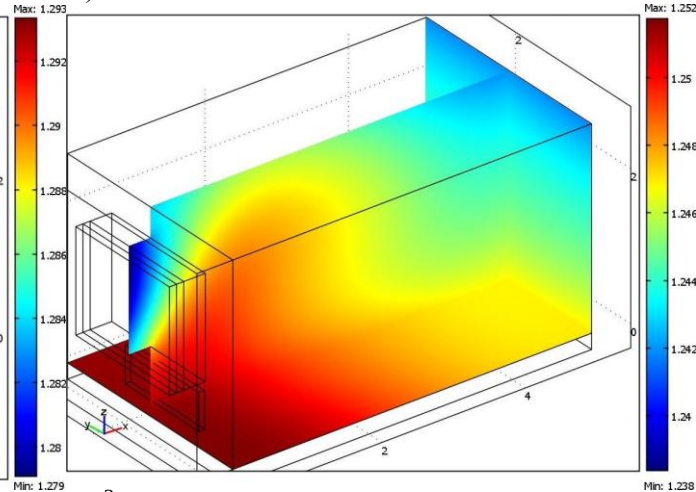


Рис. 8. Поле среднесуточных концентраций, мг/м^3 , в комнате №1 (кратность воздухообмена $0,23 \text{ ч}^{-1}$): а) аммиака; б) бензола

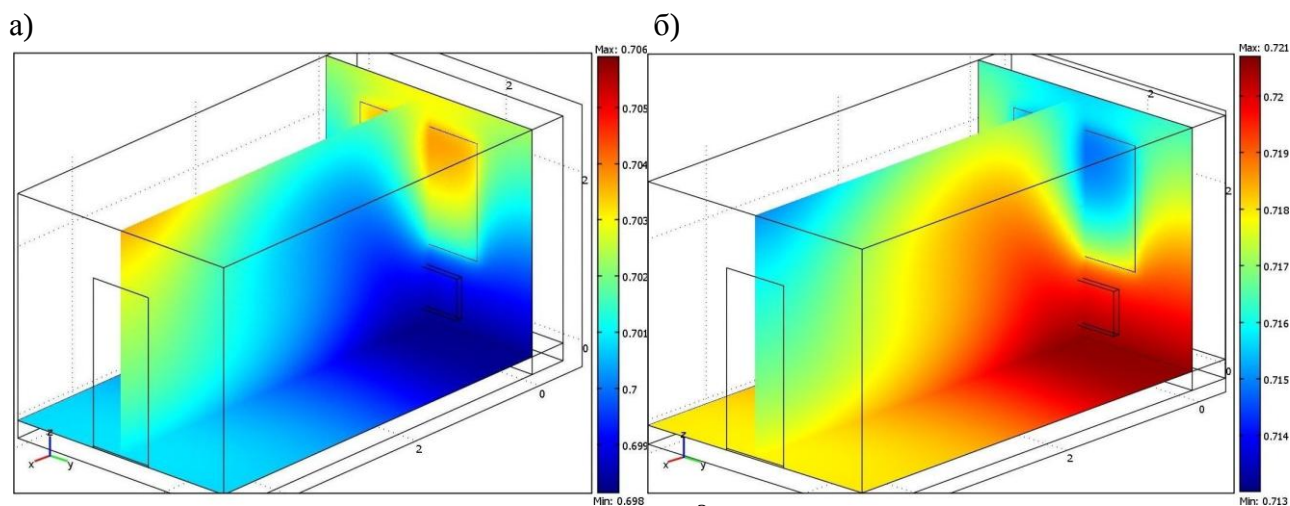


Рис. 9. Поле среднесуточных концентраций, мг/м^3 , в комнате №2 (кратность воздухообмена $0,12 \text{ ч}^{-1}$): а) аммиака; б) бензола

В табл. 4 приведено сравнение значений среднесуточных концентраций в комнате 1, полученных в результате расчётов и эксперимента.

Таблица 4

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	$1,3 \pm 0,3$
Бензол	1,2	$1,0 \pm 0,3$

Для сравнения также выполнен перерасчёт при противоположном – юго-восточном направлении при скорости ветра $5,1 \text{ м/с}$. Сравнение результатов расчётов приведено в табл. 5.

Таблица 5

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

Контрольная точка	Концентрация, доли $\text{ПДК}_{\text{ср.сут}}$			
	При наиболее неблагоприятном северо-западном направлении ветра		При юго-восточном направлении ветра	
	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 в табл. 5, 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 $\text{ПДК}_{\text{ср.сут}}$. 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 $55 \text{ ПДК}_{\text{ср.сут}}$, для бензола $50 \text{ ПДК}_{\text{ср.сут}}$. Т.е. негативное

влияние на здоровье людей будет носить трудно выявляемый характер.

Практический интерес представляет также время, в течение которого в помещениях будут сохраняться повышенные концентрации вредных веществ. Для этого ДУ диффузии решается нестационарно. На рис. 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. 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.

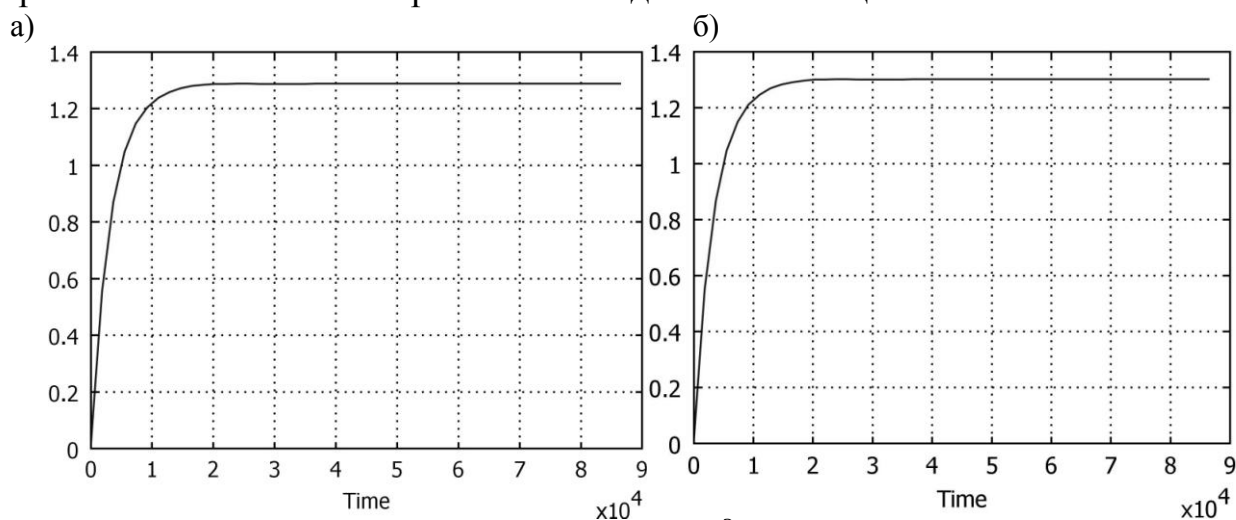


Рис. 10. Графики зависимости концентрации, мг/м^3 , от времени, сек., в центре комнаты 1 при смене направления ветра с юго-восточного на северо-западное в течение суток: а) аммиака; б) бензола

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:

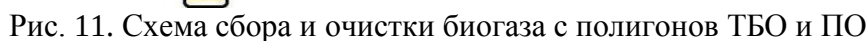
1. Расчёт эмиссии компонентов биогаза по предложенным зависимостям с учётом условий эксплуатации полигона и условий разложения отходов.
2. Определение граничных условий, характеризующих действие полигона ТБО и ПО как источника: концентрация компонента биогаза на поверхности полигона при наличии грунтовой 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 за-

7. Расчёт среднесуточного количества примеси, поступающей в здание с приточным воздухом.

9. Расчёт среднесуточных концентраций компонентов биогаза в помещении.

В случае выявления загрязнения воздуха биогазом в количествах превышающих допустимые значения необходимо выполнение соответствующих мероприятий по его снижению.

Для снижения выброса в атмосферу и повышения качества биогаза как топлива усовершенствована классическая схема его сбора и очистки (рис. 11).



20

и прочих примесей биогаз очищается в фильтре 8, заполненном цеолитами ($\text{Me}_{2/n}\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$). Очищенный газ 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 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 административно-хозяйственной зоны (АХЗ) полигонов. Водно-пылевая смесь, продукты взаимодействия подлежат захоронению на полигоне или переработке.

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

На рис. 12 в качестве примера приведена предпроектная схема сбора и утилизации биогаза на полигоне «Центральный».

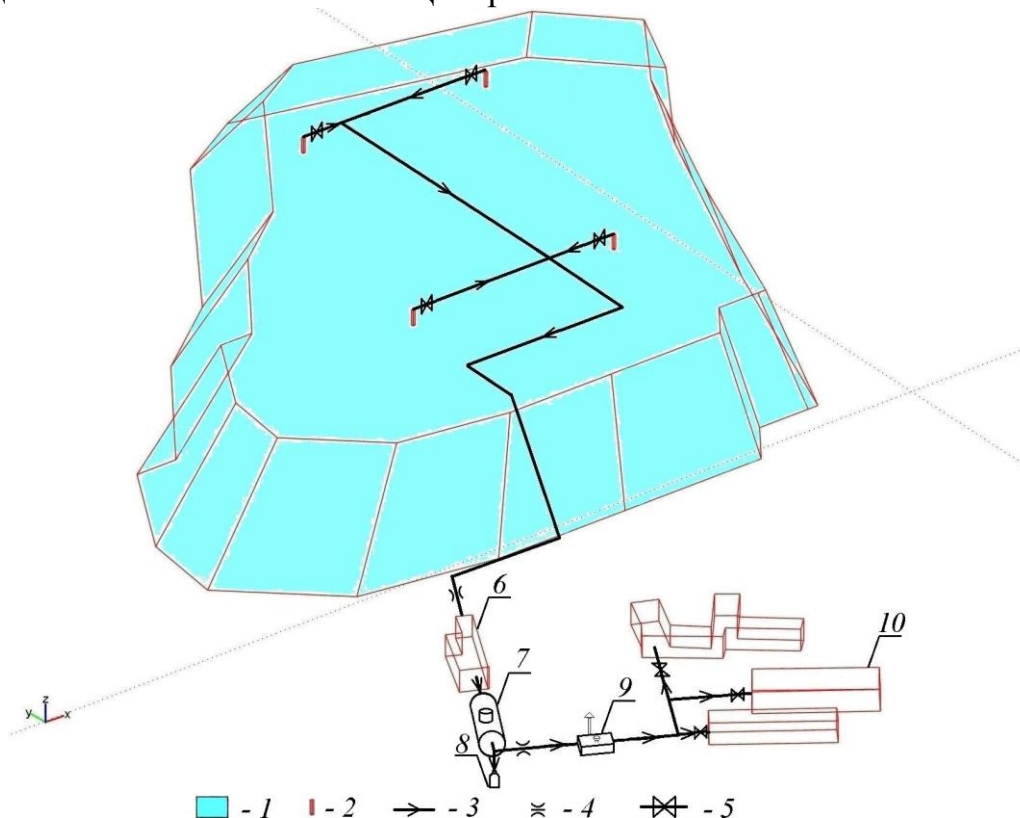


Рис. 12. Предпроектная схема сбора и утилизации биогаза на полигоне «Центральный»: 1 – термоэластомерная плёнка; 2 – газодренажная скважина; 3 – трубопровод; 4 – термозапорный клапан; 5 – вентиль; 6 – здание, оборудованное узлами очистки и одорации биогаза; 7 – газгольдер; 8 – заправка газовых баллонов; 9 – блочно-модульная котельная; 10 – здания

Вся поверхность полигона ТБО и ПО покрывается термоэластомерной плёнкой 1, имеющей высокую механическую прочность, износостойкость, сопротивляемость воздействию масел, растворителей, погодных и климатических условий. Т.к. метаногенез на полигоне происходит ограниченное количество

лет, то система должна быть максимально компактной, при необходимости относительно быстро быть демонтированной. Компрессоры, установки очистки и одорации биогаза располагаются в здании 6, удаление углекислого газа из которого выполняется с помощью вытяжной вентиляции. Избытки биогаза целесообразно поставлять в баллонах 8.

За счёт сбора и очистки биогаза концентрации большинства загрязняющих веществ (кроме углекислого газа), содержащихся в биогазе, снижаются до фоновому уровня. В табл. 6 в качестве примера приведены значения приземных концентраций ряда веществ, которые содержались бы в наружном воздухе вблизи полигона «Центральный», начиная с тёплого периода 2006 г. при наличии и отсутствии системы сбора и очистки биогаза.

Таблица 6

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

Ориентировочные капитальные затраты на внедрение системы на полигоне составляют около 34,04 млн. руб., срок окупаемости с учётом экономии на плате за загрязнение атмосферы составляет около 2,1 года.

Общие выводы

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;
- газотеплоэнергетического 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 ТБО и ПО.
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 используются в проектно-конструкторской деятельности ООО «Тэсла» (г. Санкт-Петербург) и в учебном процессе кафедры «Безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ».

III. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **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. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2012/5/11.pdf> (0,19/0,31 п. л.).
2. **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 (0,19 п. л.).

3. **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. Режим доступа: <http://www.science-education.ru/pdf/2013/2/209.pdf> (0,38 п. л.).

публикации в других изданиях:

4. **Сауц, А.В.** Граничные условия численного моделирования рассеивания биогаза над полигоном / А.В.Сауц / Инженерно-экологические системы: материалы Междун. конгресса, посвящ. 180-летию СПбГАСУ. – СПб: СПбГАСУ, 2012. – С. 155-158 (0,19 п. л.).

5. **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 (0,28/0,03 п. л.).

6. **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. Режим доступа: <http://spbtes.ru/expert/ob-energeticheskom-obsledovanii-vozobnovlyaemyh-istochnikov-energii-teplovizionnoe> (0,25 п. л.).

7. **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.Семенов / Перспективы развития автомобилей. Развитие транспортных средств с альтернативными энергоустановками: материалы 75-й Междунар. науч.-тех. конф. Ассоциации автомоб. инженеров. – Тольятти: ОАО «АВТОВАЗ», 2011. – С. 255-258 (0,29/0,11 п. л.).

8. **Сауц, А.В.** Переработка твёрдых бытовых отходов. Уточнение уравнения 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: РИИ, 2011. – С. 125-128 (0,11/0,08 п. л.).

9. **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 (0,21/0,06 п. л.).

10. **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 (0,5/0,13 п. л.).

11. **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 (0,15/0,04 п. л.).
12. **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> (0,41 п. л.).
13. **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> (0,44 п. л.).
14. **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> (3,6 п. л.).