

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Трехмерный код расчета
радиационной обстановки
на промышленной площадке АЭС
с учетом застройки

Учебная версия E1.0

РОУЗ/E1.0

Учебное пособие

Москва 2018

УДК 621-039
ББК 31.49—32.973.26
Т66

Трехмерный код расчета радиационной обстановки на промышленной площадке АЭС с учетом застройки. Учебная версия. РОУЗ/Е1.0 : Учебное пособие ; М. : Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. — 134 с. : ил. (в пер.).

В пособии описаны модели и подходы, реализованные в программном средстве РОУЗ, разработанном в Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и предназначенном для оценки радиационной обстановки на промплощадке АЭС при атмосферных выбросах радиоактивных веществ. Пособие содержит описание используемых моделей, численных алгоритмов, руководство по пользованию ПС и серию практических заданий.

Для студентов старших курсов, научных работников, инженеров и проектантов, специализирующихся в области анализа безопасности на АЭС.

СОДЕРЖАНИЕ

Содержание.....	3
Введение	5
1. Общая характеристика кода	6
1.1. Назначение и область применения ПС.....	6
1.2. Допустимые значения параметров и ограничения применения	6
1.3. Сведения о некоторых методиках расчета, используемых в ПС	7
1.4. Постановка задачи в ПС	7
1.5. Возможности визуализации в ПС	8
1.6. Ограничения учебной версии.....	8
2. Описание ПС РОУЗ. математические модели	10
2.1. Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПС.....	10
2.2. Основные допущения.....	11
2.3. Основные уравнения	12
2.3.1. Уравнение неразрывности	12
2.3.2. Уравнение для скорости потока.....	12
2.3.3. Уравнение для температуры.....	14
2.3.4. Уравнение для концентрации примеси	15
2.4. Модель турбулентности.....	15
2.4.1. Расчет скорости трения у поверхности земли и зданий при различных стратификациях в коде РОУЗ	17
2.4.2. Параметризация турбулентного потока тепла от поверхности земли при различных стратификациях в коде РОУЗ.....	18
2.5. Граничные и начальные условия для температуры, скорости и концентрации	18
2.5.1. Начальные условия расчета	19
2.5.2. Граничные условия для скорости	19
2.5.3. Граничные условия для концентрации примесей.....	20
2.5.4. Граничные условия для потенциальной температуры.....	21
2.6. Численный метод решения системы уравнений.....	22
2.6.1. Расчетная сетка	22
2.6.2. Алгоритм и численная схема решения уравнений гидродинамики.....	22
2.7. Численная схема решения уравнения атмосферной дисперсии примеси	25
2.7.1. Разностная схема адвекции.....	25
2.7.2. Алгоритм расчета динамической скорости.....	27
2.7.3. Алгоритм расчета силы трения	27
2.7.4. Алгоритм расчета плотности выпадений	28
2.8. Методика определения категории устойчивости атмосферы	28
3. Руководство по пользованию ПС	33
3.1. Описание пакета поставки.....	33

3.2.	Установка ПС.....	33
3.3.	Структура кода	34
3.4.	Набор входных и выходных данных	38
3.5.	Подготовка данных для расчета.....	41
3.5.1.	Программная оболочка	41
3.5.2.	Ввод исходных данных по геометрии задачи	43
3.5.3.	Компоненты главного окна.....	46
3.5.4.	Сетка и карта.....	67
3.6.	Редактор сценариев	72
3.7.	Запуск программы	76
3.8.	Просмотр результатов моделирования.....	76
3.8.1.	Основные понятия	77
3.8.2.	Расчет мощностей доз	77
3.8.3.	Основные элементы интерфейса программы.....	78
3.8.4.	Карта	98
3.8.5.	Локальный вид.....	98
3.8.6.	Окно отображения поверхностной концентрации аэрозолей	100
3.8.7.	Окно редактирования легенды	101
3.8.8.	Окно управления курсором	103
4.	Практикум	104
4.1.	Практическое задание № 1	104
4.1.1.	Построение модели объекта в геометрическом редакторе.....	104
4.1.2.	Создание сценария выброса	109
4.1.3.	Работа с симулятором	110
4.2.	Практическое задание № 2	114
4.2.1.	Создание сценария выброса	114
4.2.2.	Работа с симулятором	115
4.3.	Практическое задание № 3	117
4.3.1.	Сценарий 1	117
4.3.2.	Сценарий 2	126

ВВЕДЕНИЕ

Данное учебное пособие предназначено для подготовки квалифицированных пользователей к работе с программным средством (ПС) РОУЗ. В учебном пособии собраны материалы, знакомящие пользователей с физическими моделями и вычислительными алгоритмами, реализованными в ПС. Помимо описания возможностей ПС, пособие включает в себя руководство пользователя, в котором представлена инструкция по подготовке исходных данных для расчета, запуска программы и обработки результатов.

Основная задача, которую ставят авторы пособия, это научить пользователя самостоятельно ставить расчетную задачу в рамках ПС, производить вычисления и анализ полученных результатов для задач безопасности на АЭС.

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОДА

1.1. Назначение и область применения ПС

ПС РОУЗ предназначено для оценки радиационной обстановки на промплощадке АЭС или других ОИАЭ при атмосферных выбросах радиоактивных веществ с учетом влияния промышленной застройки (реальной трехмерной геометрии объекта).

ПС может также использоваться для оценок радиационной или токсикологической обстановки при выбросах радиоактивных или токсичных веществ в городской застройке.

ПС отчуждаемо от разработчиков, снабжено графическим интерфейсом (препроцессором и постпроцессором), встроенным руководством пользователя.

ПС РОУЗ рассчитывает следующие параметры:

- мгновенные значения объемных концентраций каждого радионуклида;
- мгновенные значения поверхностных концентраций каждого радионуклида;
- мощности дозы и дозы облучения людей от всех радионуклидов, присутствующих в источнике выброса, на разные органы с учетом возрастных групп и по разным путям облучения: внешнее облучение от радиоактивного облака, внешнее облучение от загрязненной поверхности, внутреннее облучение от ингаляционного поступления радионуклидов.

1.2. Допустимые значения параметров и ограничения применения

Допустимые значения параметров в области применения кода следующие.

- Скорость ветра: 1—20 м/с на высоте 10 м.
- Стратификация атмосферы: все типовые атмосферные стратификации от класса А (сильно неустойчивая) до класса G (сильно устойчивая) по классификации Тернера с поправками [1].
- Допустимая высота выброса: <300 м.
- Размеры элементов застройки должны быть больше в 10—15 раз шероховатости поверхности. Например, при шероховатости порядка 0,1 м, высота застройки должна быть более 1—1,5 м.
- Продолжительность выброса произвольная при произвольном временном сценарии.
- Продолжительность прогноза полей концентрации для постоянного или мгновенного источника должна быть примерно равна длительности выброса плюс время прохода облака через расчетную область: $T+L/V$, где T — длительность выброса, L — характерный горизонтальный размер расчетной области, V — характерная скорость ветра.
- При расчете атмосферного переноса радионуклидов в аэрозольной и/или газовой форме поле скорости ветра предполагается стационарным (установившимся). Учет изменения силы и направления ветра со временем невозможен.
- Среда распространения радионуклидов — только воздушная. Миграция радионуклидов в водной среде и в почве, облучение по водным путям и через пищевые цепочки не рассчитываются.
- Для применения ПС требуется специально разработанная трехмерная цифровая модель объекта в формате STL. Модель может быть создана как внутри ПС, так и другими сторонними программами, предназначенными для тех же целей.

- Данный учебный программный код может работать на персональных компьютерах, на которых установлена одна из 64-разрядных операционных систем семейства Windows, начиная с Windows 7. В операционной системе должна быть корректно настроена поддержка русских шрифтов.
- Существуют дополнительные ограничения, связанные с особенностью специальной учебной версии (подраздел 1.6).

1.3. Сведения о некоторых методиках расчета, используемых в ПС

Базовые компоненты ПС РОУЗ, включают модуль расчета трехмерного поля скорости ветра на основе решения уравнений Навье—Стокса в Рейнольдсовом приближении, модуль расчета атмосферной турбулентной адвекции-диффузии примесей в газовой и аэрозольной форме, модуль расчета доз от произвольного облака и загрязненной поверхности.

Блок расчета трехмерного поля ветра с учетом влияния городской застройки в ПС РОУЗ использует модифицированную версию прецизионной LES модели CONV-3D [2]. Версия ПС РОУЗ использует k - ϵ модель турбулентности, разработанную специально для учёта температурной стратификации атмосферы и использующую граничные условия для k и ϵ , не требующих сгущения расчетной сетки к твердой поверхности. Подробное описание методик, результаты верификации содержатся в [3]. Информация содержится также в данном учебном пособии.

Для моделирования атмосферного переноса радионуклидов в условиях промышленной застройки используются специальные трехмерные цифровые модели объекта, отражающие габариты зданий и сооружений и относительные расстояния между ними.

1.4. Постановка задачи в ПС

Атмосферный перенос представляет один из основных путей распространения в окружающей среде радиоактивного загрязнения при выбросах активности на объектах использования ядерной энергии (ОИЯЭ). Решение задачи обоснования безопасности таких объектов требует расчетного прогнозирования процессов распространения радионуклидов в атмосфере. Для этого широко используются математические модели атмосферной дисперсии, предназначенные для разных масштабов расстояний переноса.

Характерной особенностью моделирования атмосферного переноса примесей в локальном масштабе (т. е., в пределах промплощадки АЭС или другого ОИЯЭ) является то, что вертикальный и горизонтальный размеры облака или струи выброса сопоставимы с размерами резко обозначенных препятствий в виде зданий и сооружений индустриальной застройки. Элементы застройки фактически формируют трехмерное поле скорости ветра, и на первый план выходят такие аэродинамические эффекты, как рециркуляционные зоны, аэродинамическая тень и другие, благодаря которым локальные направление и скорость ветра могут радикально отличаться от крупномасштабных усредненных значений. Все эти факторы сильно влияют на движение и рассеивание облака примеси. Упрощенные подходы, которые не учитывают реальную геометрию препятствий, приводят к нефизичному распределению поля примеси. Фактические поля загрязнения могут радикально отличаться от рассчитанных на основе гауссовых закономерностей [3].

Корректный метод решения этой задачи — прямое решение полной системы уравнений гидродинамики Навье—Стокса и некоторых их упрощений с соответствующими граничными условиями на твердых поверхностях и с использованием моделей турбулентности в трехмерной постановке.

Для каждой созданной в геометрическом редакторе (далее *GeometryEditor*) трехмерной модели расчетной области и сгенерированной для этой модели расчетной сетки можно поставить одну или более задач распространения. Граничные и начальные условия к задаче переноса импульса, тепла и примеси ставятся путем задания нескольких параметров в редакторе сценариев (далее *EditInp*) распространения примеси. Направление, скорость ветра, класс устойчивости атмосферы, а также шероховатость поверхностей полностью определяют граничные условия на поле скорости ветра. Устойчивость атмосферы полностью определяет граничные условия на поле потенциальной температуры, также рассчитываемой в вычислительном ядре ПК РОУЗ. Интенсивность, радионуклидный состав выброса, его временная динамика, также задаваемые в *EditInp*, полностью определяют правую часть уравнения переноса примеси. Скорости осаждения радионуклидов на горизонтальные и вертикальные поверхности определяют граничные условия на концентрацию примеси на твердых границах ячеек расчетной сетки, то есть интенсивность стока плотности активности из трехмерных объемных расчетных ячеек на поверхности земли и зданий.

Визуализация результатов расчета осуществляется с помощью постпроцессора-визуализатора (далее *Simulator*). С помощью данного ПС, входящего в ПК РОУЗ, можно визуализировать результаты расчета: поле ветра, объемные и поверхностные концентрации, поле потенциальной температуры и дозы облучения.

1.5. Возможности визуализации в ПС

Расчетные данные ПС РОУЗ, концентрации радионуклидов, метеорологические данные представляют собой трехмерные массивы большой размерности, и их анализ практически невозможен без развитой системы визуализации. ПС РОУЗ содержит специальный программный модуль, предназначенный для визуализации расчетных и исходных данных.

Возможности модуля визуализации:

- визуализация исходной геометрии площадки рассматриваемого объекта;
- просмотр с разных позиций;
- просмотр в разных масштабах;
- оценка высоты, размеров зданий на основе отображаемых параметров курсора;
- визуализация расчетных полей скорости ветра;
- визуализация трехмерных полей концентраций примеси, мощностей дозы и доз в отдельных выбранных точках;
- просмотр мощности дозы и интегральной дозы на траектории движения;
- визуализация плотности выпадений на вертикальные и горизонтальные поверхности;
- заказ сброса рассчитываемых полей с желаемой периодичностью.

1.6. Ограничения учебной версии

В учебную версию кода РОУЗ введены следующие ограничения:

- Исключена возможность расчета радиационной обстановки на реальных объектах, за исключением Белоярской АЭС. В пакет поставки учебной версии входит скомпилированная трехмерная модель Белоярской АЭС. Закрыта возможность импорта трехмерных моделей из STL файлов в препроцессоре *GeometryEditor*, предназначенном для создания трехмерной расчетной сетки.
- Исключена возможность использования модели ПСА для восстановления вертикального профиля скорости ветра с учетом разворота по высоте. Используется более простая степенная модель.
- Введено ограничение на шаг сетки по пространству: ≥ 4 м.

- Введено ограничение на размер расчетной области по осям X и Y: ≤ 800 м.
- Введено ограничение на количество расчетных ячеек: $\leq 2,000,000$.
- Ограничен список доступных нуклидов: ^{22}Na , ^{24}Na , ^{131}Ia , ^{132}Ia , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{85}Kr , $^{85}\text{Kr-m}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe .
- Референтная скорость ветра может принимать только два значения: 3 и 4 м/с.
- Доступно только два класса устойчивости атмосферы: F и G.

2. ОПИСАНИЕ ПС РОУЗ. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

Для моделирования атмосферного переноса и расчета радиационной обстановки в условиях промышленной застройки используются:

- модели восстановления параметров набегающего потока (атмосферного пограничного слоя на основе ограниченной информации — о классе устойчивости и о скорости и направлении ветра на высоте флюгера);
- специальные трехмерные цифровые модели объекта, отражающие габариты зданий и сооружений и относительные расстояния между ними;
- модели расчета доз от облака произвольной формы и загрязненной поверхности, с учетом параметра видимости для человека, находящегося вне зданий и сооружений, вследствие экранирования элементами застройки;
- модели расчета доз от ингаляции.

При проведении расчетов прогнозируется трехмерное поле ветра внутри промышленной застройки, неизотропные характеристики турбулентности.

Расчет параметров радиационной обстановки в ПС РОУЗ проводится в расчетной области в форме прямоугольного параллелепипеда с горизонтальными и вертикальными гранями, внутри которого размещаются все элементы застройки промплощадки. Нижняя горизонтальная сторона параллелепипеда соответствует уровню земной поверхности, верхняя сторона выбирается выше наиболее высокого здания в области (в 2–3 раза). Взаимная ориентация границ области и стен зданий может быть произвольной. Твердыми границами являются границы зданий и часть нижней границы области, свободная от застройки. Остальные границы – условные.

В ПС РОУЗ расчет трехмерного поля скорости ветра вычисляется прямым решением уравнений Навье—Стокса в Рейнольдсовом приближении с соответствующими граничными условиями на твердых поверхностях и с использованием моделей турбулентности в области сложной геометрии (трехмерная распределенная модель). Расчет распространения примесей в вычисленном ветровом поле производится на основе решения трехмерного уравнения адвекции-диффузии с коэффициентами турбулентного обмена, полученными в k - ϵ модели турбулентности.

Начальные и граничные условия для уравнений генерируются автоматически при задании исходных данных – параметров источника и ограниченной метеорологической информации (класс устойчивости, скорость и направление ветра на высоте флюгера).

Используемая модель турбулентности модифицирована для учета влияния устойчивости атмосферной стратификации за счет коррекции коэффициентов турбулентной диффузии и граничных условий для величин k и ϵ , и модификации уравнений переноса этих величин с учетом плавучести [3]. Рассчитывается осаждение частиц на горизонтальных и вертикальных поверхностях.

По международной классификации ПС РОУЗ — microscale meteorological model RANS типа.

2.1. Сведения о базах данных (библиотеках констант), используемых в ПС

При проведении расчетов используются следующие базы данных:

- База данных для 129 радионуклидов по коэффициентам дозового преобразования;

- Для дозовых коэффициентов внутреннего облучения (ингаляции) используется документ: «ICRP Database of Dose coefficients: Workers and Members of the Public. CD-ROM. Elsevier Science. 1998»;
- Для дозовых коэффициентов внешнего облучения: «IAEA, VIENNA, 2000. IAEA-TECDOC-1162. ISSN 1011-4289».

Указанные данные являются неотъемлемой частью ПС.

Верификация проведена в соответствии с международными требованиями к моделям класса MMM (Microscale Meteorological Model). Учтены рекомендации по выбору верификационных экспериментов:

- «Michael Schatzmann, Helge Olesen and Jörg Franke: COST 732 Model Evaluation Case Studies: Approach and Results. University of Hamburg Meteorological Institute Centre for Marine and Atmospheric Sciences, 2010, <http://www.mi.uni-hamburg.de/Official-Documents.5849.0.html>».
- «Jörg Franke, Antti Hellsten, Heinke Schlünzen and Bertrand Carissimo: Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST 732 report, Hamburg, 2007, ISBN: 3-00-018312-4».
- «COST 732. Official Documents. COST-MUST and COST-OKC referenced datasets. <http://www.mi.zmaw.de/index.php?id=5849>».
- «Compilation of Experimental Data for Validation of Microscale Dispersion Models (CEDVAL). Hamburg University. <http://www.mi.zmaw.de/index.php?id=432>».
- «Special Issue Joint Urban 2003. Journal of Applied Meteorology and Climatology, Volume 46, Issue 12 (December 2007)».

При постановке граничных условий (восстановление профиля ветра в атмосферном пограничном слое по классу устойчивости) используются: «Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (Технический документ МПА-98). — М. : Минатом России, 1998).

2.2. Основные допущения

В модели приняты следующие допущения:

- Скорость ветра (≤ 20 м/с) существенно меньше скорости звука, для обеспечения условия несжимаемости.
- Высота расчетной области не превышает 300 м (над подстилающей поверхностью — землей), так что относительные гидростатические изменения плотности воздуха из-за изменения давления и температуры с высотой в расчетной области также малы и не превышают нескольких процентов. Это дает основание применять приближение Буссинеска.
- Переносимая примесь рассматривается как пассивная, не оказывающая влияния на поток несущей среды — воздуха — и не обладающая собственной плавучестью. Аэрозольные частицы считаются безынерционными, т. е. адвекция и турбулентная диффузия частиц происходят так же, как и для газовых компонент.
- Теплоемкость воздуха считается постоянной, теплосодержание переносимых примесей считается пренебрежимо малым.
- Воздух считается сухим, т. е. влияние водяного пара на теплофизические свойства, а также фазовые переходы не учитываются.

Молекулярная вязкость и теплопроводность мала по сравнению с турбулентной вязкостью и теплопроводностью, все течения считаются турбулентными при числах Рейнольдса $Re > 10^5$.

2.3. Основные уравнения

Модель основана на решении уравнений Навье—Стокса в Рейнольдсовом приближении совместно с уравнением для потенциальной температуры и адвекции-диффузии примесей в естественных переменных и позволяет рассчитывать поле скоростей ветра и моделировать распространение загрязнения с учетом сложной геометрии объекта. Турбулентные течения моделируются в коде с использованием RANS k-ε модели турбулентности, настроенной специально на атмосферные задачи рассматриваемого класса. Уравнения гидродинамики и переноса примесей записаны относительно усредненных по временному масштабу турбулентных пульсаций величин. Входящие в них турбулентные коэффициенты переноса рассчитываются на основании модели турбулентности.

Обоснование приближений самой гидротермодинамической модели и модели турбулентности приведены в [3]. Здесь приводятся сами уравнения, и кратко их обоснование.

2.3.1. Уравнение неразрывности

В силу принятых допущений плотность несущей среды — атмосферного воздуха в расчетной области практически постоянна, что позволяет рассматривать его как несжимаемую жидкость. В этом случае из общего уравнения непрерывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1.1)$$

следует:

$$\operatorname{div} \vec{u} = 0 \quad (1.2)$$

Здесь приняты обозначения: ρ — плотность, $\vec{u} = (u_1, u_2, u_3)$ — вектор скорости (усредненные по турбулентным пульсациям). В коде используется уравнение несжимаемости в виде $\operatorname{div}(\vec{u}) = 0$.

2.3.2. Уравнение для скорости потока

Исходным является обычное уравнение сохранения импульса жидкости с учетом поля тяжести:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} P + \vec{\nabla}(\rho \nu_T \vec{\nabla}) \vec{u} + \rho \vec{g} + \vec{f}, \quad (1.3)$$

где P — давление, ν_T — турбулентная вязкость, \vec{g} — ускорение силы тяжести, \vec{f} — внешняя объемная сила. В коде это уравнение используется в преобразованном виде, чтобы учесть явно силы плавучести. Усредненная плотность, давление и температура записываются в виде:

$$\rho = \rho_0 + \delta \rho, \quad P = P_0 + \delta P, \quad T = T_0 + \delta T, \quad (1.4)$$

где $\rho_0 = \rho_0(z)$, $P_0 = P_0(z)$, $T_0 = T_0(z)$ (z — вертикальная координата, отсчитываемая вверх от поверхности) — начальные невозмущенные вертикальные профили плотности, давления и температуры атмосферы, от которых отсчитываются возмущения $\delta \rho$, δP и δT (возмущениями плотности в данном случае пренебречь нельзя, в отличие от уравнения непрерывности, поскольку именно они отвечают за появление сил плавучести). В качестве невозмущенного состояния атмосферы выбирается такое, при котором значения всех параметров — P , ρ , T , — на

поверхности равны значениям для рассматриваемого «возмущенного» состояния, а вертикальные профили этих параметров соответствуют нейтральной стратификации атмосферы. В этом случае удельная энтропия воздуха в невозмущенном состоянии не меняется с высотой, а давление, плотность и температура воздуха связаны друг с другом законом адиабаты:

$$\left(\frac{\rho_0(z)}{\rho_{00}}\right) = \left(\frac{P_0(z)}{P_{00}}\right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad \left(\frac{T_0(z)}{T_{00}}\right) = \left(\frac{P_0(z)}{P_{00}}\right)^{\frac{(\gamma-1)}{\gamma}}, \quad (1.5)$$

где индексом 00 обозначены значения параметров на подстилающей поверхности. Температура сухого воздуха при нейтральной стратификации имеет постоянный вертикальный градиент, называемый сухоадиабатическим:

$$\vec{\nabla} T_0 = \frac{\vec{g}}{C_p}, \quad (1.6)$$

где C_p — теплоемкость воздуха.

Полагая отклонения давления и плотности от нейтрально-устойчивого профиля в уравнениях (1.4) малыми, подставляем (1.4) в (1.3). Тогда с учетом условия гидростатического равновесия

$$\vec{\nabla} P_0 = \rho_0 \vec{g}, \quad (1.7)$$

получаем следующую формулу:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} \delta P + \vec{\nabla} (\rho v_r \vec{\nabla}) \vec{u} + \delta \rho \vec{g} + \vec{f}, \quad (1.8)$$

Последний член справа в уравнении (1.8) соответствует силам плавучести, возникающим из-за изменения плотности воздуха относительно невозмущенного состояния. При нейтральной стратификации атмосферы (в невозмущенном состоянии) этот член равен нулю, и плавучесть никак не проявляется.

Отклонение плотности $\delta \rho$ между фактическим и невозмущенным состоянием может быть связано как с отклонением температуры, так и с отклонением давления:

$$\frac{\delta \rho}{\rho} = \frac{\delta P}{P} - \frac{\delta T}{T} \quad (1.9)$$

(воздух считается идеальным газом). Давление в невозмущенном состоянии должно удовлетворять условию равновесия (1.7), из которого следует, что изменение давления от поверхности к точке на некоторой высоте z равно:

$$dP = P(z) - P_{00} = -g \rho_{av} z, \quad (1.10)$$

где ρ_{av} — некоторое среднее значение плотности между значениями ρ_{00} и $\rho(z) = \rho_{00} + d\rho$. Поскольку dP и $d\rho$ в соответствии с принятыми допущениями — малые величины одного порядка, то с точностью до величин второго порядка малости:

$$dP \approx -\rho_{00} g z \quad (1.11)$$

Таким образом, в первом приближении давление на высоте z не зависит от профиля плотности и одинаково для фактического и невозмущенного состояний. Разница между ними, т. е. первый член правой части уравнения (1.9), является величиной второго порядка малости и им можно

пренебречь. Изменение же температуры между невозмущенным и возмущенным состояниями на одной высоте — величина первого порядка малости, поэтому оно и определяет изменение плотности. Изменение плотности $\delta\rho$, выраженное через δT , подставляется в предпоследний член правой части уравнения (1.8), отвечающий за силы плавучести. В остальных членах уравнения (1.8) в первом приближении можно пренебречь малыми вариациями плотности и считать плотность постоянной, равной плотности вблизи подстилающей поверхности. Поэтому уравнение для скорости принимает вид:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u}\vec{\nabla})\vec{u} = -\vec{\nabla}\delta P + \vec{\nabla}(\rho\nu_T\vec{\nabla})\vec{u} + \rho\vec{g}\frac{\delta T}{T} + \vec{f}. \quad (1.12)$$

2.3.3. Уравнение для температуры

При вычислении температуры воздуха при течении в поле тяжести удобно использовать так называемую потенциальную температуру. Потенциальная температура $\theta(z)$ некоторого объема воздуха, находящегося на высоте z с давлением $P(z)$ — это температура газа в этом объеме, приведенная в адиабатическом процессе к давлению P_{00} на поверхности земли ($z=0$):

$$\theta(z) = T(z) \left(\frac{P_{00}}{P(z)} \right)^{\frac{1-\gamma}{\gamma}} \quad (1.13)$$

При нейтральной стратификации атмосферы, когда имеет место уравнение (1.6), потенциальная температура воздуха постоянна (не зависит от высоты) и равна температуре на поверхности. Можно показать, что в этом случае:

$$\theta(z) = T(z) + \frac{g}{C_p} z. \quad (1.14)$$

С учетом этого соотношения входящую в уравнение (1.12) разность температур между возмущенным и невозмущенным состоянием воздуха в одной точке на высоте z можно представить как разность потенциальных температур:

$$\delta T = \delta\theta, \quad (1.15)$$

причем невозмущенная потенциальная температура постоянна во всем пространстве. С учетом уравнения (1.15) уравнение (1.12) принимает вид:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u}\vec{\nabla})\vec{u} = -\vec{\nabla}\delta P + \vec{\nabla}(\rho\nu_T\vec{\nabla})\vec{u} + \rho\vec{g}\frac{\delta\theta}{T} + \vec{f}. \quad (1.16)$$

В этом виде оно используется в коде.

При медленных течениях воздуха с изменением высоты в отсутствие перемешивания температура в выделенном лагранжевом объеме газа меняется по адиабатическому закону в соответствии с изменением давления окружающей среды. При этом потенциальная температура в пробном объеме сохраняется, так что $d\theta/dt=0$. С учетом процессов турбулентного обмена теплом, связанным с турбулентным перемешиванием, уравнение переноса потенциальной температуры имеет вид:

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial\theta}{\partial t} + \vec{u}\vec{\nabla}\theta = \vec{\nabla}(\chi_T\vec{\nabla}\theta). \quad (1.17)$$

В уравнении (1.17): θ — потенциальная температура, χ_T — турбулентный коэффициент температуропроводности, по порядку величины равный коэффициенту турбулентной кинематической вязкости.

2.3.4. Уравнение для концентрации примеси

Если имеется несколько видов примесей, то для моделирования атмосферного переноса каждой из них используется уравнение вида:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \vec{\nabla}(\bar{u}C_i) = \vec{\nabla}(D_T \vec{\nabla} C_i) + Q_{C_i}. \quad (1.18)$$

Или, с учетом уравнения (1.2):

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \bar{u} \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla}(D_T \vec{\nabla} C_i) + Q_{C_i}. \quad (1.19)$$

В уравнениях (1.18) и (1.19): C_i — концентрация i -ой примеси; D_T — коэффициент турбулентной диффузии примесей; Q_{C_i} — мощность источника i -ой примеси. Коэффициент турбулентной диффузии считается одинаковым для всех видов примесей (газовых и аэрозольных) в соответствии с принятыми допущениями.

Для учета осаждения аэрозольных частиц к скорости ветра добавляется скорость гравитационного оседания частиц. Тогда уравнение (1.19) принимает вид:

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\bar{u} + \vec{w}_i) \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla}(D_T \vec{\nabla} C_i) + Q_{C_i}. \quad (1.20)$$

В уравнении (1.20): \vec{w}_i — вектор скорости гравитационного оседания для данной группы частиц (имеет только вертикальную компоненту).

Таким образом, уравнения (1.2), (1.16), (1.17), (1.20) составляют систему уравнений, которая используется в коде для расчета трехмерного поля скорости ветра, температуры и концентрации примесей. Входящие в них коэффициенты турбулентной вязкости, температуропроводности и диффузии определяются с помощью модели турбулентности.

2.4. Модель турбулентности

Для замыкания приведенной выше системы уравнений гидродинамики используется разработанная модификация модели турбулентности. Подробное обоснование и описание модели изложено в [3]. Здесь приводятся окончательные уравнения и формулы, используемые в коде.

Исходной является стандартная k - ε модель турбулентности с двумя уравнениями для двух параметров — кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и скорости диссипации кинетической энергии ε (ДКЭТ).

Уравнение для КЭТ имеет вид:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{\nabla}(k\bar{u}) = \vec{\nabla}\left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \vec{\nabla} k\right) + S + G - \varepsilon, \quad (1.21)$$

где μ_T — турбулентная вязкость, \bar{u} — усредненная скорость, σ_k — эмпирический коэффициент. Величина G в правой части описывает генерацию (или подавление) турбулентности за счет стратификации атмосферы и аппроксимируется выражением, пропорциональным градиенту потенциальной температуры:

$$\frac{\bar{g}}{\theta}(\overline{u'\theta}) = G = \frac{\mu_T}{\sigma_\theta} \frac{\bar{g}}{\theta} \bar{\nabla} \bar{\theta} \quad (1.22)$$

Первый член справа в уравнении (1.21) является параметризацией выражения, отвечающего за перенос энергии турбулентности пульсациями скорости:

$$-\frac{\overline{\partial u'_j k'}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) \quad (1.23)$$

Параметр S отвечает за генерацию турбулентности за счет сдвиговых напряжений, определяются следующим выражением:

$$S = \mu_T \left[\frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}. \quad (1.24)$$

Уравнение для ДКЭТ имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{\nabla}(\varepsilon \bar{u}) = \bar{\nabla} \left(\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \bar{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} S + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}. \quad (1.25)$$

Это уравнение содержит 5 эмпирических констант: $C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, $C_{\varepsilon 3}$, σ_k , σ_ε . В таком виде оно широко используется в моделях турбулентности, например, в [4].

Величина турбулентной вязкости, входящая в усредненное уравнение Навье—Стокса, выражается через решение уравнений (1.21) и (1.25) следующим образом:

$$\mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (1.26)$$

Модификация исходной модели проведена по двум направлениям:

- изменен набор констант по отношению к классической модели;
- изменены граничные условия на твердых поверхностях для величин k и ε .

Входящие в уравнения k – ε модели константы определены эмпирически в основном на основе инженерных задач. Для атмосферных приложений (высокие значения чисел Рейнольдса, влияние стратификации) эти константы могут быть, вообще говоря, другими. В разрабатываемом коде используется набор констант, откорректированных на основании данных наблюдений [5]. Таблица модифицированных коэффициентов приведена в отчете [3].

Модификация граничных условий следующая. Вблизи твердой поверхности кинетическая энергия турбулентности и турбулентный коэффициент вязкости стремятся к нулю. Для того чтобы избежать необходимости дробления расчетной сетки около твердых поверхностей для отслеживания детального поведения этих величин, при формулировании граничного условия используется применяемые в метеорологии соотношения для КЭТ и ДКЭТ на основе законов подобия пограничного слоя атмосферы.

Фактически использована простейшая двухслойная модель аналогично моделям, описанным в работах [6—8]. Под первым слоем здесь понимается совокупность всех ячеек, пересекающихся

с границей. Второй слой — совокупность всех остальных расчетных ячеек, не имеющих пересечения с границами области. В первом слое используется алгебраическая модель Прандтля, основанная на понятии длины перемешивания. Для второго слоя используется приведенная здесь k - ε модель. При этом параметры турбулентности (k и ε) на границе первого слоя на расстоянии Δ от поверхности (предполагается, что она находится в пределах логарифмического слоя) вычисляются следующим образом:

$$k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}}, \quad (1.27)$$

$$\varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \Delta}. \quad (1.28)$$

Выражения (1.27)—(1.28) после подстановки в формулу (1.26) дают правильное значение турбулентной вязкости в приповерхностном слое:

$$\mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = C_\mu \frac{u_*^4 / C_\mu}{u_*^3 / (\kappa \Delta)} = \kappa \Delta u_* \quad (1.29)$$

Выражение справа соответствует определению турбулентного коэффициента вязкости в алгебраической модели Прандтля.

2.4.1. Расчет скорости трения у поверхности земли и зданий при различных стратификациях в коде РОУЗ

Скорость трения рассчитывается по-разному для различных стратификаций. Для неустойчивых (А, В, С) и нейтральной (D) стратификации используется следующая параметризация:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{r}\right) - \left(\ln\left(\frac{1+\xi^2}{2}\right) + 2\ln\left(\frac{1+\xi}{2}\right) - 2\arctg(\xi) + \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (1.30)$$

где $\xi = \left(1 - \frac{\gamma z}{L}\right)^{0.25}$.

Константы: $\kappa = 0.41$; $\gamma = 15$; L — масштаб Монина-Обухова, который в коде зависит только от класса устойчивости атмосферы (типичные значения для разных классов устойчивости указаны в таблице 2.1), r — шероховатость подстилающей поверхности, м.

Таблица 2.1. Масштаб Монина—Обухова в зависимости от класса устойчивости атмосферы [19]

Класс устойчивости атмосферы	A	B	C	D	E	F	G
Среднее значение масштаба Монина-Обухова	-5	-25	-70	-500	55	5	1
Минимальное значение	-10	-40	-100	$-\infty$	10	1	0
Максимальное значение	0	-10	-40	± 100	100	10	1

Абсолютное значение масштаба Монина—Обухова для нейтральной стратификации должно быть больше 100.

При стремлении масштаба Монина—Обухова к бесконечности (нейтральная стратификация), формула (1.30) переходит в классическую параметризацию:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{r}\right). \quad (1.31)$$

Для устойчивых (E, F, G) стратификаций используется параметризация:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln\left(\frac{z}{r}\right) + \frac{\beta z}{L} \right]. \quad (1.32)$$

где $\beta = 4.7$. При стремлении L к бесконечности формула (1.32), как и формула (1.30), переходит в формулу (1.31).

2.4.2. Параметризация турбулентного потока тепла от поверхности земли при различных стратификациях в коде РОУЗ

В код РОУЗ введена оценка турбулентного теплового потока от поверхности земли в ближайшие приземные расчетные ячейки. Параметризация зависит от устойчивости атмосферы. Физически турбулентный поток тепла от поверхности земли представляет собой произведение пульсации вертикальной компоненты скорости ветра на пульсацию потенциальной температуры вблизи поверхности земли $w'\theta'$. Для неустойчивой и нейтральной стратификации используется соотношение:

$$\overline{w'\theta'} = -u_* \frac{\theta^{BO3} - \theta^{zem}}{\frac{R}{\kappa} \left(\ln\left(\frac{z}{r}\right) - 2 \ln\left(\frac{1+\eta^2}{2}\right) \right)}, \quad (1.33)$$

где $\eta = \left(1 - \frac{\lambda z}{L}\right)^{0.25}$.

Константы: $R=0,74$; $\lambda=9$. u_* — рассчитывается из уравнения (1.30) или (1.32), θ^{BO3} — потенциальная температура воздуха у поверхности земли на следующем шаге по времени $(n+1)$, θ^{zem} — температура земли, которая поддерживается постоянной в процессе счета.

Для устойчивых стратификаций используется параметризация:

$$\overline{w'\theta'} = -u_* \frac{\theta^{BO3} - \theta^{zem}}{\frac{R}{\kappa} \left(\ln\left(\frac{z}{r}\right) + \frac{\beta z}{RL} \right)}, \quad (1.34)$$

Значение турбулентной вязкости в приповерхностном слое определяется соотношением (1.29).

2.5. Граничные и начальные условия для температуры, скорости и концентрации

Уравнения (1.2), (1.16), (1.17), (1.20) требуют задания граничных и начальных условий для компонент скорости, температуры, концентрации примеси. Указанные уравнения формально решаются во всей расчетной области, включая и фиктивные ячейки. При этом в фиктивных ячейках всем вычисляемым величинам, а также коэффициентам в уравнениях присваиваются

нулевые значения. Граничные условия ставятся только на границах расчетной области. На границах твердых тел внутри области граничные условия формально не ставятся, однако, благодаря тому, что в приповерхностных ячейках заданы значения величин и коэффициентов уравнений, это эквивалентно определенным специальным граничным условиям на твердых поверхностях.

2.5.1. Начальные условия расчета

- В начальный момент времени задаются распределения концентрации примесей и компонент скорости ветра, которые удовлетворяют следующим условиям:
- Горизонтальные компоненты скорости ветра во всей расчетной области выстраиваются автоматически в соответствии со статистическими моделями вертикальных закономерностей структуры АПС в зависимости от температурной стратификации. Поле горизонтальной скорости однородно в горизонтальном направлении в области, не занятой застройкой. Внутри застройки компоненты скорости ветра равны нулю.
- Вертикальная компонента скорости ветра равна нулю во всей расчетной области.
- Возмущение гидростатического давления в расчетной области равно нулю.
- Потенциальная температура воздуха зависит только от высоты и имеет заданный постоянный вертикальный градиент (в зависимости от стратификации). Заложены статистические модели вертикального температурного градиента в зависимости от класса устойчивости.
- Концентрация примесей во всей расчетной области равна нулю.

2.5.2. Граничные условия для скорости

На верхней горизонтальной границе расчетной области ставится условие свободного вытекания.

Вертикальные границы области разделены на две группы. К первой относятся границы, через которые воздух в соответствии с направлением ветра, втекает внутрь расчетной области. Ко второй – те, через которые воздух вытекает из расчетной области. Предполагается, что вертикальные границы свободны от застройки.

На границах первой группы задаются компоненты вектора скорости ветра. При этом скорость и направление ветра на этих границах (эти данные выстраиваются автоматически, если пользователь задает скорость и направление ветра на высоте 10 метров, класс стабильности на основе статистических моделей АПС [9], и параметр шероховатости подстилающей поверхности). Горизонтальная компонента скорости ветра на границе зависит только от высоты и не зависит от горизонтальных координат.

На границах второй группы задается граничное условие свободного вытекания по алгоритму, как и на верхней границе расчетной области.

На границах раздела твердой поверхности и воздуха, то есть на общей грани воздушной и фиктивной ячеек значение вязкости равно 0. Это эквивалентно тому, что на этих границах ставится условие свободного скольжения — нормальная компонента скорости и производная тангенциальной компоненты по нормали к поверхности равны 0. При таком условии не учитывается обмен импульсом между воздухом и твердыми стенками. Для учета этого обмена используется слагаемое \vec{F} в правой части уравнения (1.16)– объемная сила трения о стенку, которое отлично от нуля лишь в приповерхностных ячейках расчетной сетки. Объемная сила, действующая на некоторую ячейку, по абсолютной величине равна:

$$\rho u_*^2 \frac{S}{V} = \frac{\rho u_*^2}{h}, \quad (1.35)$$

где S — площадь поверхность твердой грани расчетной ячейки, V — объем ячейки, h — высота ячейки (ее размер в направлении по нормали к твердой грани). Сила направлена против потока, вызывая тормозящее действие. Динамическая скорость u_* вычисляется по формулам, приведенным в пункте 2.4.1.

2.5.3. Граничные условия для концентрации примесей

На вертикальных границах области первой группы задается условие равенства 0 концентрации всех примесей: $C_i=0$.

На вертикальных границах расчетной области второй группы диффузионный поток примесей через границу считается много меньшим, чем адвективный поток (там, где этот потоки отличен от нуля). Поэтому граничное условие на этих границах — условие отсутствия диффузионного потока примесей:

$$\vec{n}\vec{\nabla}C_i=0. \quad (1.36)$$

Рассмотрим теперь физические граничные условия для уравнения диффузии примесей на границе твердых тел. Для газовых составляющих примеси, не взаимодействующих химически с поверхностью, очевидно, имеет место условие (1.36). Что касается аэрозольной составляющей, то здесь граничные условия формулируются исходя из двухслойной модели пограничного слоя, включающего:

- область вязкого подслоя, где собственно турбулентная диффузия отсутствует, а имеют место другие механизмы переноса (броуновская диффузия, турбофорез и др.) и проявляется инерционность частиц (граница считается гладкой);
- область логарифмического профиля, где частицы считаются не инерционными (пульсации скорости медленные), и единственный механизм переноса — турбулентная диффузия, с таким же коэффициентом, как для диффузии газа, по порядку равным турбулентной вязкости газа $D \sim 0.4u_*y$ (u_* — динамическая скорость, y — расстояние до стенки по нормали, коэффициент 0,4 — постоянная Кармана).

Граничное условие на плоской поверхности — граничное условие 3-го рода, которое ставится на границе вязкого подслоя и отражает равенство потоков частиц — диффузионного потока из области логарифмического профиля к границе подслоя и потока через подслой собственно на стенку, который выражается через скорость сухого осаждения и концентрацию на границе слоя:

$$J = D \frac{dC}{dy} = 0.4u_*y \frac{dC}{dy} = C_0v_d, \quad (1.37)$$

где J — поток частиц на стенку, C_0 — концентрация на границе слоя, неизвестная величина, которая находится как решение уравнения турбулентной диффузии, v_d — скорость сухого осаждения (здесь считаем ее заданной).

В силу малой толщины подслоя, которая не разрешается расчетной сеткой задачи граничное условие может быть отнесено к стенке.

Пусть в первом расчетном узле на расстоянии y_1 от стенки концентрация равна C_1 . Поскольку $J(y)=const$ (рассматривается стационарный случай), проинтегрируем уравнение (1.37) от границы слоя до первого узла сетки, получим:

$$C_1 - C_0 = \frac{J}{0.4u_*} \ln(y_1 / y_0) = C_0 \frac{V_d}{0.4u_*} \ln(y_1 / y_0), \quad (1.38)$$

следовательно:

$$C_0 = C_1 \left(\frac{V_d}{0.4u_*} \ln(y_1 / y_0) + 1 \right)^{-1}. \quad (1.39)$$

Если выполняется условие:

$$\frac{V_d}{0.4u_*} \ln(y_1 / y_0) \ll 1, \quad (1.40)$$

то $C_1 - C_0 \ll C_0$, и можно положить $C_0 = C_1$. Это соответствует граничному условию:

$$J = 0 \Rightarrow \frac{dC}{dy} = 0 \quad (1.41)$$

— условие отсутствия диффузионного потока на границе при решении уравнения турбулентной диффузии. Таким образом, в этом случае концентрация на поверхности может быть найдена из решения уравнения диффузии с граничным условием (1.41), а поток на поверхность оценивается как:

$$J = C_0 V_d, \quad (1.42)$$

где C_0 — решение на стенке при нулевом потоке.

Условие (1.41) в коде предполагается выполненным. Поэтому граничное условие на твердых стенках для уравнения адвекции-диффузии должно быть следующим:

$$\vec{n} \vec{\nabla} C_i = 0. \quad (1.43)$$

Оно реализуется за счет того, что коэффициент турбулентной диффузии примеси на твердых границах полагается равным 0.

2.5.4. Граничные условия для потенциальной температуры

На верхней горизонтальной границе ставится условие отсутствия потока тепла через границу:

$$\vec{n} \vec{\nabla} \theta = 0, \quad (1.44)$$

где \vec{n} — единичный вектор нормали к поверхности.

На вертикальных границах области первой группы задается потенциальная температура, зависящая только от высоты z и не зависящая от горизонтальных координат. Таким образом, считается, что втекающий воздух имеет фиксированный вертикальный профиль температуры. Профиль считается линейным, с постоянным градиентом, величина которого задается пользователем. Профиль выстраивается автоматически на основе известных статистических моделей исходя из класса стабильности атмосферы и температура воздуха у поверхности земли. Граничный профиль температуры соответствует начальному профилю температуры в расчетной области в начальный момент времени.

Считается, что на вертикальных границах расчетной области второй группы поток тепла за счет теплопроводности через границу много меньше конвективного потока. Поэтому граничное условие на этих границах — условие отсутствия потока тепла за счет теплопроводности (уравнение (1.44)).

Аналогичное граничное условие фактически реализуется на твердых поверхностях — границах элементов застройки. Это достигается тем, что теплопроводность на твердых границах полагается равной 0.

2.6. Численный метод решения системы уравнений

2.6.1. Расчетная сетка

Для аппроксимации уравнений в частных производных используется конечно-разностный подход. Уравнения решаются на ортогональной, вообще говоря, неравномерной, декартовой сетке, которая покрывает всю расчетную область. Сетка является разнесенной.

Узлы давления и температуры отнесены к центрам ячеек, для которых рассчитывается разностный оператор дивергенции. Плотность, температура, коэффициенты вязкости (диффузии и температуропроводности) задаются также в центрах ячеек. К центрам ячеек относятся также параметры модели турбулентности k , ε , S , G .

Компоненты скорости относятся к центрам граней ячеек, причем, на каждой грани задается нормальная к ней компонента скорости, так что разные компоненты скорости заданы в разных точках, на разных гранях одной ячейки.

При таком построении сетки часть ячеек оказывается внутри элементов застройки (фиктивные ячейки), а их фактические границы будут проходить внутри граничных ячеек. Эти границы корректируются таким образом, чтобы грани расчетных ячеек совпадали с откорректированными границами.

Для моделирования внутренних течений вязкой теплопроводящей жидкости в областях сложной формы применяется метод фиктивных областей (МФО), что позволяет использовать относительно простой сквозной алгоритм для решения задач в областях сложной формы, имеющих сложную внутреннюю структуру. Так, для уравнения Навье—Стокса в RANS постановке в соответствии с методом МФО в правую часть вводится искусственная сила сопротивления, пропорциональная скорости с коэффициентом сопротивления, равным нулю в ячейках, заполненных воздухом и принимающим очень большое значение в фиктивных ячейках. Это позволяет формально решать уравнение во всей области, включая фиктивные ячейки, причем в них за счет высокого сопротивления скорость фактически равна нулю.

Численный алгоритм решения уравнений Навье—Стокса в RANS постановке такой же, как в LES версии ПК CONV-3D [2].

Для построения неявной схемы решения уравнений гидротермодинамики используется схема расщепления. Расщепление производится по физическим процессам. Слагаемые уравнения движения разбиваются на две группы: первая включает конвективные и вязкие члены, вторая — градиент давления. Полученная схема типа «предиктор—корректор» является безусловно устойчивой в линейном приближении, гарантирует ограниченность дискретного решения [2].

2.6.2. Алгоритм и численная схема решения уравнений гидродинамики

Ниже перечислены основные особенности алгоритма решения уравнений Навье—Стокса в RANS приближении. Дискретные аппроксимации строятся с использованием конечно-объемных методов и разнесенных сеток.

- Для построения неявной схемы для нестационарных уравнений гидродинамики применена операторная схема расщепления.
- В динамических уравнениях операторы расщепляются на две части. Первая часть связана с процессами адвекции и диффузии, в то время как вторая часть связана с градиентом давления.
- Для работы с нерегулярными комплексными вычислительными областями используется метод фиктивных областей (МФО).
- Для нестационарного уравнения теплопроводности используется полностью неявная схема.

- Для решения задачи адвекции в уравнении движения используется нелинейная операторная схема расщепления [2].
- Кроме этого, в уравнении движения применена специальная аппроксимация конвективных слагаемых для получения дискретного конвективного оператора, который является кососимметричным и не дает вклада в кинетическую энергию (т. е. является энергетически нейтральным).
- Схема обеспечивает второй порядок по пространству и первый по времени [2].
- Алгоритм является устойчивым при достаточно больших шагах интегрирования по времени [2].

Полученные сеточные эллиптические уравнения решаются на каждом временном слое, используя открытый итерационный код SBAND7.

При решении уравнений гидродинамики используется схема расщепления по физическим процессам, которая в операторном виде выглядит следующим образом:

$$\frac{\mathbf{w}^{n+1/2} - \mathbf{w}^n}{\tau} + A_1 \mathbf{w}^{n+1/2} + A_2 \mathbf{w}^n = \mathbf{f}^n, \quad \mathbf{x} \in \omega, \quad (1.45)$$

$$\frac{\mathbf{w}^{n+1} - \mathbf{w}^n}{\tau} + A_1 \mathbf{w}^{n+1/2} + A_2 \mathbf{w}^{n+1} = \mathbf{f}^n, \quad \mathbf{x} \in \omega, \quad (1.46)$$

$$\operatorname{div}_h \mathbf{w}^{n+1} = 0, \quad \mathbf{x} \in \omega^*. \quad (1.47)$$

Здесь верхние индексы n и $n+1$ используются для обозначения следующих один за другим временных слоев сетки по времени ($t^n = ndt, n=1,2,\dots$), \mathbf{x} — радиус-вектор координат, \mathbf{w} — вектор скорости, ω — сеточное пространство расчетной области, $A_1=C_1+D_1$ — сумма операторов конвективного (C_1) и диффузионного (D_1) переноса импульса, A_2 — оператор градиента давления. Оператор C_1 определяется как:

$$C(\mathbf{w})w_\alpha = \frac{1}{2} [(\mathbf{w}\nabla)w_\alpha + \nabla(\mathbf{w}w_\alpha)], \quad (1.48)$$

где индекс $\alpha=1\div 3$ отмечает номер пространственной координаты. Оператор D_1 определяется как:

$$D(\mathbf{w})_\alpha = \vec{\nabla}(\rho v_T \vec{\nabla})w_\alpha, \quad (1.49)$$

а оператор A_2 как:

$$A_2 = \vec{\nabla}P. \quad (1.50)$$

Для численной реализации схем (1.45)—(1.47) вычтем уравнение (1.45) из уравнения (1.46) и получим так называемое уравнение стабилизирующей поправки:

$$\frac{\mathbf{w}^{n+1} - \mathbf{w}^{n+1/2}}{\tau} + \operatorname{grad}_h(p^{n+1} - p^n) = 0, \quad \mathbf{x} \in \omega \quad (1.51)$$

Из уравнения (1.51) получим выражение для \mathbf{w}^{n+1} :

$$\mathbf{w}^{n+1} = \mathbf{w}^{n+1/2} - \tau \operatorname{grad}_h(p^{n+1} - p^n), \quad \mathbf{x} \in \omega \quad (1.52)$$

и подставим его в уравнение неразрывности (1.47), учитывая, что $\mathbf{w}^{n+1} = 0$ на границе $\partial\omega$.

Обозначив $\delta p = p^{n+1} - p^n$, получим уравнение Пуассона для оценки поправки давления δp :

$$\operatorname{div}_h \operatorname{grad}_h \delta p = \frac{1}{\tau} \operatorname{div}_h \mathbf{w}^{n+1/2}, \quad \mathbf{x} \in \omega \quad (1.53)$$

где:

$$(\operatorname{div}_h \mathbf{w}) = (w_1)_{x_1} + (w_2)_{x_2} + (w_3)_{x_3}; \quad \operatorname{div}_h \operatorname{grad}_h \delta P = \delta P_{\bar{x}_1 x_1} + \delta P_{\bar{x}_2 x_2} + \delta P_{\bar{x}_3 x_3} \quad (1.54)$$

Для удобства записи здесь введены обозначения для аппроксимаций пространственных производных первого и второго порядков:

$$(y_{x_1}) = \frac{y_{i+1,j,k} - y_{i,j,k}}{h_1}; \quad (y_{\bar{x}_1}) = \frac{y_{i,j,k} - y_{i-1,j,k}}{h_1}; \quad (y_{\tilde{x}_1}) = \frac{y_{i+1,j,k} - y_{i-1,j,k}}{h_1} \quad (1.55)$$

(здесь представлены производные по координате x_1 . Аналогично записываются производные по координатам x_2 и x_3). В обычных обозначениях дифференциальные операторы записываются следующим образом:

$$(\operatorname{div}_h \mathbf{w})_{i,j,k} = \frac{w_{1;i+1,j,k} - w_{1;i,j,k}}{h_1} + \frac{w_{2;i,j+1,k} - w_{2;i,j,k}}{h_2} + \frac{w_{3;i,j,k+1} - w_{3;i,j,k}}{h_3} \quad (1.56)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} (\operatorname{grad}_h \delta P)_{1;i,j,k} = \frac{\delta P_{i,j,k} - \delta P_{i-1,j,k}}{h_1} \\ (\operatorname{grad}_h \delta P)_{2;i,j,k} = \frac{\delta P_{i,j,k} - \delta P_{i,j-1,k}}{h_2} \\ (\operatorname{grad}_h \delta P)_{3;i,j,k} = \frac{\delta P_{i,j,k} - \delta P_{i,j,k-1}}{h_3} \end{array} \right. \quad (1.57)$$

$$\operatorname{div}_h (\operatorname{grad}_h \delta P)_{i,j,k} = \frac{\delta P_{i-1,j,k} + \delta P_{i+1,j,k} - 2\delta P_{i,j,k}}{h_1} + \frac{\delta P_{i,j-1,k} + \delta P_{i,j+1,k} - 2\delta P_{i,j,k}}{h_2} + \frac{\delta P_{i,j,k-1} + \delta P_{i,j,k+1} - 2\delta P_{i,j,k}}{h_3}. \quad (1.58)$$

С учетом введенных обозначений окончательные уравнения теперь следующие:

– оценка промежуточной скорости:

$$\begin{aligned} & \frac{w_\alpha^{n+1/2} - w_\alpha^n}{\tau} + \frac{1}{2} \left[w_1^n (w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_1} + w_2^n (w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_2} + w_3^n (w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_3} \right] + \\ & + \frac{1}{2} \left[(w_1^n w_\alpha^{n+1/2})_{\tilde{x}_1} + (w_2^n w_\alpha^{n+1/2})_{\tilde{x}_2} + (w_3^n w_\alpha^{n+1/2})_{\tilde{x}_3} \right] - \\ & - \frac{1}{\operatorname{Re}} \left[(w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_1 x_1} + (w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_2 x_2} + (w_\alpha^{n+1/2})_{\bar{x}_3 x_3} \right] + p_{\bar{x}_\alpha}^n = 0, \quad \mathbf{x} \in \omega, \quad \alpha = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (1.59)$$

– вычисление поправки давления:

$$\delta P = \delta P_{\bar{x}_1 x_1} + \delta P_{\bar{x}_2 x_2} + \delta P_{\bar{x}_3 x_3} = \frac{1}{\tau} \left((w_1^{n+1/2})_{x_1} + (w_2^{n+1/2})_{x_2} + (w_3^{n+1/2})_{x_3} \right), \quad \mathbf{x} \in \omega \quad (1.60)$$

$$\begin{aligned} (\delta p_{\bar{x}_1})_{2,j,k} &= \frac{1}{\tau} (w_1^{n+1/2})_{2,j,k}, & (\delta p_{\bar{x}_1})_{N_1,j,k} &= 0, \quad i=2,3\dots N_1-1 \\ (\delta p_{\bar{x}_2})_{i,2,k} &= \frac{1}{\tau} (w_2^{n+1/2})_{i,2,k}, & (\delta p_{\bar{x}_2})_{i,N_2,k} &= 0, \quad j=2,3\dots N_2-1 \\ (\delta p_{\bar{x}_3})_{i,j,2} &= \frac{1}{\tau} (w_3^{n+1/2})_{i,j,2}, & (\delta p_{\bar{x}_3})_{i,j,N_3} &= 0, \quad k=2,3\dots N_3-1 \end{aligned} \quad (1.61)$$

$$\sum_{\mathbf{x} \in \omega} \delta p h_1 h_2 h_3 = 0, \quad (1.62)$$

– оценка скорости и давления на следующем временном слое:

$$w_\alpha^{n+1} = w_\alpha^{n+1/2} - \tau \delta p_{\bar{x}_\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad \mathbf{x} \in \omega, \quad (1.63)$$

$$p^{n+1} = p^n + \delta p, \quad \mathbf{x} \in \omega, \quad (1.64)$$

2.7. Численная схема решения уравнения атмосферной дисперсии примеси

Аварийный выброс приводит к появлению полей примеси с большими градиентами концентраций. Моделирование распространения примеси в эйлеровых переменных предъявляет повышенные требования к выбору численных схем. Это связано, с известными проблемами при аппроксимации адвективных слагаемых.

2.7.1. Разностная схема адвекции

Для ПК РОУЗ, по сравнению с возможностями CONV-3D создан дополнительный вариант расчета адвекции, на основе версии метода КАБАРЕ, характеризующийся повышенной точностью и монотонностью при моделировании адвекции, для величин с большими градиентами [10–14].

Учитывая алгоритм расчета в ПК РОУЗ, опишем вариант численной схемы КАБАРЕ для расчета адвекции примеси в стационарном неоднородном поле скоростей.

Перепишем адвективные слагаемые в виде:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = 0. \quad (1.65)$$

Уравнение 61 представляет собой трехмерное линейное уравнение переноса, откуда следует, что вдоль характеристик $\lambda = u$, $\lambda = v$ и $\lambda = w$ переносится сама концентрация.

Тогда схему КАБАРЕ для уравнения (1.65) представим как (здесь и далее в этом подпункте будут опущены слагаемые, вычисляемые вдоль осей y и z , — они записываются аналогично приведенным вдоль оси x):

$$\begin{aligned}
 & \frac{C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1} - C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^n}{\tau} + \\
 & + \frac{(cu)_{i+1,j+1/2,k+1/2}^n + (cu)_{i+1,j+1/2,k+1/2}^{n+1}}{2} - \frac{(cu)_{i,j+1/2,k+1/2}^n + (cu)_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1}}{2} + \dots = \\
 & = \frac{Q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^n + Q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1}}{2}
 \end{aligned} \tag{1.66}$$

где Q — аппроксимация правой части уравнения переноса примеси (турбулентная диффузия, источники, стоки).

Схема КАБАРЕ в такой форме является неявной, поэтому для ее разрешения используется метод предиктор-корректор в совокупности с линейной экстраполяцией концентрации вдоль характеристик.

Шаг-предиктор:

$$\begin{aligned}
 & \frac{C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^n}{\tau/2} + \frac{(cu)_{i+1,j+1/2,k+1/2}^n - (cu)_{i,j+1/2,k+1/2}^n}{X_{i+1} - X_i} + \dots = \\
 & = Q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^n
 \end{aligned} \tag{1.67}$$

Линейная экстраполяция на новый временной слой:

$$\tilde{c}_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} = \begin{cases} 2C_{i-1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - c_{i-1,j+1/2,k+1/2}^n, & \text{if } (u_{i,j+1/2,k+1/2} > 0), \\ c_{i,j+1/2,k+1/2}^n, & \text{if } (u_{i,j+1/2,k+1/2} = 0), \\ 2C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2} - c_{i+1,j+1/2,k+1/2}^n, & \text{if } (u_{i,j+1/2,k+1/2} < 0). \end{cases} \tag{1.68}$$

Величины $\tilde{c}_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1}$ и $\tilde{c}_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1}$ для направлений вдоль осей y и z вычисляются аналогичным образом.

Коррекция потоковых переменных:

$$c_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1} = \min \left[\max \left\{ \tilde{c}_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1}, C_{\min} \right\}, C_{\max} \right], \tag{1.69}$$

где C_{\min}, C_{\max} — оценка минимума и максимума концентрации на новом временном слое внутри ячейки, откуда была произведена экстраполяция. Величины $c_{i+1/2,j,k+1/2}^{n+1}$ и $c_{i+1/2,j+1/2,k}^{n+1}$ вычисляются аналогично.

Шаг-корректор:

$$\begin{aligned}
 & \frac{C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1} - C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1/2}}{\tau/2} + \frac{(cu)_{i+1,j+1/2,k+1/2}^{n+1} - (cu)_{i,j+1/2,k+1/2}^{n+1}}{X_{i+1} - X_i} + \dots = \\
 & = Q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}^{n+1}
 \end{aligned} \tag{1.70}$$

Аппроксимация правой части:

Правую часть уравнений (1.67) и (1.70) будем аппроксимировать явным семи точечным шаблоном:

$$Q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2} = \frac{\mu_T}{Sc_T} \left(\frac{1}{x_{i+1} - x_i} \left(\frac{C_{i+3/2,j+1/2,k+1/2} - C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}}{(x_{i+2} - x_i)/2} - \frac{C_{i+1/2,j+1/2,k+1/2} - C_{i-1/2,j+1/2,k+1/2}}{(x_{i+1} - x_{i-1})/2} \right) + \dots \right) + q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}, \quad (1.71)$$

где $q_{i+1/2,j+1/2,k+1/2}$ — мощность источников примеси в ячейке.

2.7.2. Алгоритм расчета динамической скорости

Динамическая скорость вычисляется для приграничного слоя ячеек, т. е. ячеек, у которых одна или несколько граней являются границами твердого тела. Эта скорость относится к центру такой ячейки. Для каждой граничной грани вычисляются параллельные ей компоненты скорости, отнесенные к центру ячейки. Это делается путем интерполяции значений нужной компоненты на двух принадлежащих ячейке параллельных друг другу гранях, на которых эта компонента задана, на середину ячейки. При этом учитывается, что на твердых гранях приповерхностных (имеющих общую грань с фиктивными ячейками) расчетных ячеек скорость течения равна 0. Так, если ячейка, центр которой содержит индексы (i, j, k) , имеет граничную грань, ориентированную нормально к оси x и имеющую индексы $(i+1, j, k)$, то соответствующая параллельная ей скорость имеет компоненты y и z . Обозначим ее абсолютную величину v_{yz} . Принимая во внимание выражения для расчета динамической скорости из пункта 2.4.1, например, для нейтральной стратификации, динамическая скорость вычисляется по формуле:

$$u_{*i+1} = \frac{F_{i+1,j,k} \kappa v_{yz}}{\ln \left(\frac{x_{i+1} - x_i}{2r} \right)}, \quad (1.72)$$

где v_{yz} — модуль проекции скорости на плоскость $x=\text{const}$ в узле ячейки (i, j, k) .

2.7.3. Алгоритм расчета силы трения

Сила трения рассчитывается на основе формулы (1.35). Компоненты вектора силы трения относятся к граням так же, как и компоненты скорости.

Рассмотрим грань, нормальную к оси x , общую для двух смежных ячеек с индексами $(i-1, j, k)$ и (i, j, k) . Предположим, что твердые поверхности, смежные с этими ячейками, нормальны к оси z . Обозначим x -компоненту скорости потока, заданной на этой грани, через U_c . Тогда в общем виде, с учетом того, что несколько граней могут быть твердыми, x -компонента силы трения на рассматриваемой грани вычисляется следующим образом:

$$f_x = -\text{sign}(U_c) \left[\frac{(F_{i-1,j,k-1} + F_{i+1,j,k-1})(u_{*k-1})^2 + (F_{i-1,j,k+1} + F_{i+1,j,k+1})(u_{*k+1})^2}{z_{k+1} - z_{k-1}} \right]. \quad (1.73)$$

Заметим, что u_{*k-1} и u_{*k+1} в формуле 1.73 рассчитываются исходя из x -компоненты скорости течения, а не из тангенциальной компоненты.

2.7.4. Алгоритм расчета плотности выпадений

Поток аэрозольных частиц на поверхность рассчитывается на основании формулы (1.42). Изменение поверхностной концентрации частиц (плотности выпадений) G определяется уравнением:

$$\frac{dG}{dt} = J = C_0 V_d. \quad (1.74)$$

Рассмотрим расчетную ячейку с индексами (i, j, k) с объемной концентрацией примеси C_{ijk} . Рассмотрим также ее грань, общую с ячейкой $(i-1, j, k)$. Нормаль к этой грани направлена вдоль оси x . Пусть эта грань является твердой, поверхностная концентрация на ней равна G_{ijk} . Обозначим через v_d^{i-1} — скорость осаждения на эту грань (аналогичный смысл имеют величины v_d^{i+1} , v_d^{j-1}, v_d^{j+1} , v_d^{k-1}, v_d^{k+1}). Тогда полное количество примеси, осевшее на эту грань из рассматриваемой ячейки за временной шаг dt равно:

$$dA_{ijk} = SC_{ijk} v_d^{i-1} dt = \frac{VC_{ijk} v_d^{i-1} dt}{h_x} = A_{ijk} \frac{v_d^{i-1} dt}{h_x}, \quad (1.75)$$

где $A_{ijk} = C_{ijk} V$ — полное количество примеси в ячейке, V — объем ячейки, S — площадь рассматриваемой грани, h_x — высота ячейки (ее размер в направлении, нормальном к рассматриваемой грани). На такую же величину уменьшается полное содержание примеси в данной ячейке. Плотность выпадений за временной шаг увеличится на величину dA_{ijk}/S .

Выражение (1.75) корректно только при достаточно малых временных шагах, при условии $v_d^{i-1} dt / h_x \ll 1$. В коде используется точное выражение для изменения полного количества примеси в ячейке, обеспечивающее устойчивый счет при любом временном шаге:

$$dA_{ijk} = A_{ijk} \left(1 - \exp\left(-\frac{dt}{\tau}\right) \right), \quad (1.76)$$

где $\tau = h_x / v_d^{i-1}$. Назовем этот параметр временем осаждения. В общем случае, когда несколько граней рассматриваемой расчетной ячейки могут быть твердыми, время осаждения равно:

$$\frac{1}{\tau} = \frac{v_d^{i-1} F_{i-1,j,k} + v_d^{i+1} F_{i+1,j,k}}{h_x} + \frac{v_d^{j-1} F_{i,j-1,k} + v_d^{j+1} F_{i,j+1,k}}{h_y} + \frac{v_d^{k-1} F_{i,j,k-1} + v_d^{k+1} F_{i,j,k+1}}{h_z}. \quad (1.77)$$

2.8. Методика определения категории устойчивости атмосферы

Данные стандартных приземных измерений на метеостанциях не содержат информации о категории устойчивости атмосферы. В связи с этим необходимо использовать ту или иную методику для оценки и классификации состояния атмосферы.

Для приближенного описания устойчивости используют методики, основанные на наземных наблюдениях, такие как методика Паскуилла с поправками Тернера. В коде РОМ используется методика Тернера с поправками. По сравнению с классами устойчивости по Паскуиллу для этого способа характерен более детальный учет состояний атмосферы и введение в рассмотрение состояний, квалифицируемых как «очень устойчивые».

По классификации Тернера атмосферная устойчивость разделяется на 7 категорий, приведенных в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Категории устойчивости по Тернеру

Класс устойчивости	Буквенное обозначение	Цифровое обозначение
Сильно неустойчивая	A	1
Умеренно неустойчивая	B	2
Слабо неустойчивая	C	3
Нейтральная (безразличная)	D	4
Слабо устойчивая	E	5
Умеренно устойчивая	F	6
Сильно устойчивая	G	7

Основой для такого определения класса устойчивости атмосферы по данной методике является индекс инсоляции [3].

В общем случае индекс инсоляции $insol$ предварительно определяется по астрономическому времени суток T_{ast} на метеостанции, дате и координатам станции. Астрономическое время суток определяется из мирового времени (UTC), которое обычно фиксируется на метеостанциях по следующей формуле:

$$T_{ast} = T_{UTC} + \frac{LON}{15}. \quad (1.78)$$

Где LON — долгота станции. Объяснение этой формулы просто: за один солнечный час земля поворачивается на 15 градусов вокруг своей оси, а астрономическое время на нулевом меридиане совпадает со временем UTC (а также временем по Гринвичу). Время $T_{ast}=12:00$ соответствует моменту, когда высота солнца максимальна для данной точки.

Вычисление индекса инсоляции производится по следующему алгоритму. Сначала вычисляется угол между прямой, соединяющей центры Солнца и Земли, и плоскостью, перпендикулярной оси вращения Земли α_{SE} . Он максимален в момент летнего солнцестояния, минимален — в момент зимнего, равен нулю — в моменты осеннего и весеннего равноденствий:

$$\alpha_{SE} = \beta \cos\left(\frac{2\pi\Delta_{days}}{365}\right). \quad (1.79)$$

Здесь $\beta \approx 23,5$ — угол наклона оси вращения Земли, Δ_{days} — количество дней, прошедшее с момента последнего летнего солнцестояния (21 июня). Далее пусть α_{SUN} — высота Солнца в градусах в точке с координатами (LON; LAT) в момент времени h (по астрономическим часам). Тогда синус этого угла будет равен:

$$\sin \frac{\pi\alpha_{SUN}}{180} = \sin\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \sin\left(\frac{\pi\alpha_{SE}}{180}\right) + \cos\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \cos\left(\frac{\pi\alpha_{SE}}{180}\right) \cos\left[\frac{\pi(h-12)}{12}\right] \quad (1.80)$$

Формула (1.80) получена по теореме косинусов для трехгранного угла. Далее вычисляется длительность дня D_d :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{t} = -\tan \frac{\pi LAT}{180} \tan \frac{\pi \alpha_{SE}}{180}, \\ t = \max(-1, \min(1, \hat{t})), \\ D_d = \frac{24}{\pi} \arccos(t). \end{array} \right. \quad (1.81)$$

а также время восхода T_{up} и захода Солнца T_{down} :

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{up} = 12 - \frac{D_d}{2}, \\ T_{down} = 12 + \frac{D_d}{2}, \end{array} \right. \quad (1.82)$$

Если в данный момент светлое время суток, то есть, $h > T_{up}$ и $h < T_{down}$, то индекс инсоляции определяется по высоте Солнца в градусах. Если темное время — то по времени, прошедшему после захода Солнца. Данные для определения индекса инсоляции приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Индекс инсоляции в зависимости от времени суток

День		Ночь	
α_{SUN}	insol	$h - T_{down}$	insol
$<15^\circ$	1	<2	-1
$<30^\circ$	2	<7	-2
$<45^\circ$	3	>7	-3
$<60^\circ$	4		
$>60^\circ$	5		

Далее производится корректировка индекса инсоляции на основе следующей информации:

- Балл облачности В (от 0 до 10).
- Высота нижней границы облачности H_c (м).
- Видимость L_{vis} (м).
- Наличие снежного покрова.
- Время суток (день или ночь).

Балл облачности — степень закрытия облаками небосвода в десятых долях. Облачность 10 баллов — сплошная облачность; 6÷9 баллов — больше половины небосвода покрыто облаками; 4÷6 баллов — около половины.

Модифицированный индекс *insolNew* инсоляции определяется из вспомогательного индекса (принимающего значения от 0 до 6 и зависящего от времени суток, балла облачности, высоты облаков и видимости) и оригинального индекса инсоляции, определенного по таблице 3. Модифицированный индекс инсоляции определяется по таблице 2.4.

Таблица 2.4. Определение модифицированного индекса инсоляции по исходному и вспомогательному индексу

insolNew		Исходный индекс инсоляции							
		-3	-2	-1	1	2	3	4	5
Вспомогательный индекс icoll	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	1	1	1	1	2
	2	0	0	0	1	1	2	3	4
	3	-1	-1	-1	1	1	1	2	3
	4	-1	-1	-1	1	1	2	3	4
	5	-2	-1	-1	1	2	3	4	5
	6	-3	-2	-1	1	2	3	4	5

Вспомогательный индекс (обозначим его *icoll*) определяется по схеме, приведенной на рисунке 2.1.

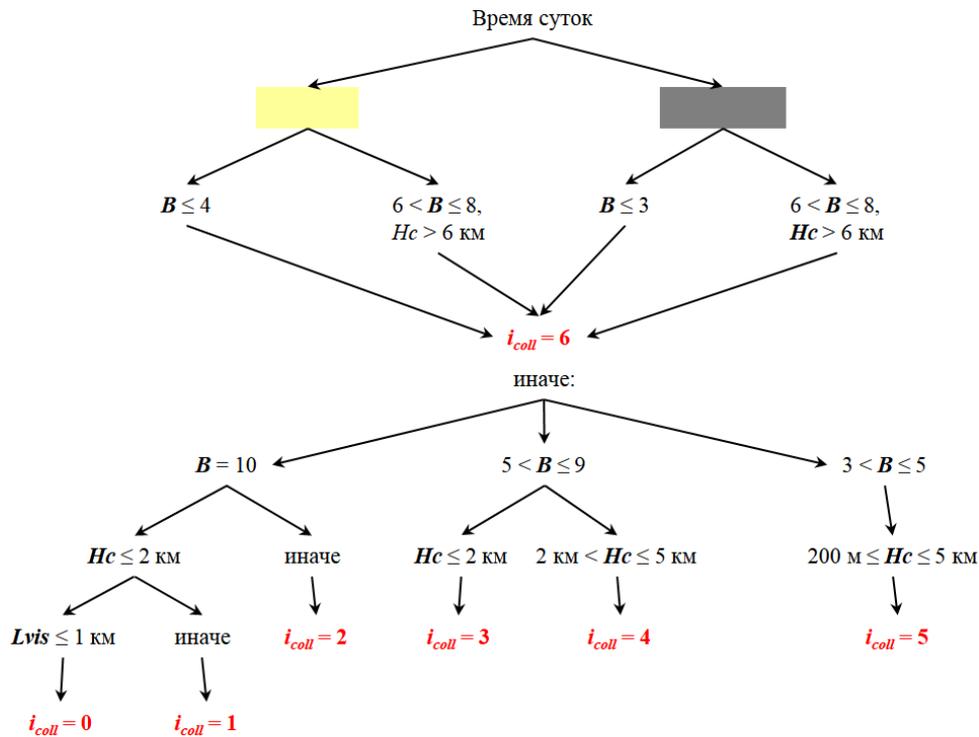


Рисунок 2.1. Схема расчета вспомогательного индекса

Если ни один из случаев, изображенных на схеме, не подходит, то принимается $i_{coll} = 6$. При наличии снежного покрова полученный модифицированный индекс корректируется: если *insolNew* равен 1, то окончательный индекс равен — 1; если *insolNew* равен —3, то окончательный индекс равен —3; в остальных случаях окончательный индекс равен *insolNew* — 1.

Класс стабильности определяется по таблице 2.5.

Таблица 2.5. Класс устойчивости атмосферы в зависимости от скорости ветра на высоте флюгера и окончательного индекса инсоляции

Класс устойчивости атмосферы		Окончательный индекс инсоляции								
		5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3
Скорость ветра, м/с	<1,5	1	1	1	2	3	4	6	7	7
	(1,5÷2)	1	1	2	2	3	4	5	6	7
	(2÷2,5)	1	1	2	2	3	4	5	6	6
	(2,5÷3)	1	2	2	3	3	4	5	6	6
	(3÷4,5)	1	2	2	3	4	4	4	5	6
	(4,5÷5,5)	2	2	3	3	4	4	4	5	5
	(5,5÷6,5)	2	3	3	3	4	4	4	4	5
	(6,5÷7,5)	2	3	3	4	4	4	4	4	5
	>7,5	3	4	4	4	4	4	4	4	4

3. РУКОВОДСТВО ПО ПОЛЬЗОВАНИЮ ПС

3.1. Описание пакета поставки

В пакет поставки учебной версии входят:

- Программа-оболочка *ModelFramework* для работы со списком объектов и сценариев распространения (создание, модификация, удаление).
- Программа для построения трехмерных моделей объектов и генерации расчетной сетки *GeometryEditor*.
- Программа для задания граничных условий и других параметров распространения *EditInp*.
- Расчетное ядро кода РОУЗ: *dister*, *for_init*, *atm_prof*, *for_calc* (все служат для подготовки расчетных данных для расчетного ядра), *rouz* (непосредственно расчетное ядро — решатель уравнений гидротермодинамики), *calc_dose_pow* (распараллеленная программа для расчета мощностей доз облучения), *idose_2d* (программа для интегрирования мощности дозы облучения по времени), *rad_situ* (скрипт для запуска модулей для расчета радиационной обстановки), *runme.bat* (скрипт для запуска всех модулей).
- Постпроцессор (*simulator2_win64*) — визуализатор результатов расчета, изменчивых во времени трехмерных полей концентраций и осаджений нуклидов, векторов скорости течения, мощностей доз и доз облучения.
- Модель объекта Белоярской АЭС.
- Учебное пособие по ПС РОУЗ/Е1.0.
- База данных по коэффициентам дозового преобразования для следующих радионуклидов: ^{22}Na , ^{24}Na , ^{131}Ia , ^{132}Ia , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{85}Kr , $^{85}\text{Kr-m}$, ^{87}Kr , ^{88}Kr , ^{133}Xe , ^{135}Xe .

3.2. Установка ПС

Работа ПС РОУЗ возможна только на машинах с 64-разрядной архитектурой. Для установки текущей версией ПК РОУЗ, необходимо скопировать директорию с ПС РОУЗ с временного носителя (диска, внешнего жесткого диска, и т.п.) в любую директорию пользовательского персонального компьютера. Необходимо установить два свободно распространяемых программных пакета. Сначала установить «The Perl Programming Language», для чего запустить от имени администратора файл «strawberry-perl-5.20.1.1-64bit.msi» и следовать инструкции инсталлятора. После устанавливается пакет «MPICH», для этого от имени администратора запускается на исполнение файл «mpich2-1.4.1p1-win-x86-64.msi», входящий в пакет поставки. После установки пакета «MPICH» необходимо произвести его настройку. Во-первых, необходимо прописать путь к исполняемому файлу «mpixes.exe» в системную переменную «PATH». Для этого нужно открыть «Панель управления» и перейти в категорию «Система». Далее нужно перейти по гиперссылке «Дополнительные параметры системы». Перед пользователем появится окно «Свойства системы». Нужно перейти по вкладке «Дополнительно» и нажать кнопку «Переменные среды...». Появится соответствующее окно. На панели «Системные переменные» необходимо найти переменную «PATH», выбрать ее и нажать кнопку «Изменить». Появится окно «Изменение системной переменной». В поле «Значение переменной» нужно в конце строки через символ «;» добавить путь к исполняемому файлу «mpixes.exe», после чего нажать «ОК». Во-вторых, нужно произвести настройку «MPICH». Для этого нужно запустить программу «cmd.exe» («Командная строка») с правами администратора. Далее с помощью команды «cd» нужно установить в качестве рабочей директории, где расположен исполняемый файл «mpixes.exe». Далее выполнить последовательно следующие команды: «smpd-uninstall», «smpd-install». При первом запуске программы «mpixes.exe» от пользователя потребуется

ввести имя пользователя в системе и пароль для аутентификации. Вызов программы «trihес.exe» осуществляется неявно, при расчете радиационной обстановки. Остальные необходимые исполняемые файлы и библиотеки содержатся в комплекте поставки. После копирования ПС на локальный диск системы пользователя и установки вышеперечисленных пакетов оно готово к работе.

3.3. Структура кода

Программный комплекс РОУЗ состоит из нескольких взаимодействующих модулей (программ). Однако следует заметить, что эти модули взаимозависимы, должны вызываться в строго заданной последовательности, а работа каждого модуля использует результаты работы предыдущих модулей. Таким образом, все модули, из которых состоит программный комплекс РОУЗ, являются зависимыми. Список модулей РОУЗ:

- программа-оболочка *ModelFramework*;
- программа для работы со сценарием *EditInp*, препроцессинг;
- программа для работы с трехмерной геометрией *GeometryEditor*, препроцессинг;
- вычислительное ядро;
- программа для визуализации результатов расчета вычислительного ядра *Simulator* (постпроцессинг);
- служебные программы.

Последовательность работы составных частей ПК представлена на рисунке 3.1:



Рисунок 3.1. Последовательность запуска программ, входящих в состав ПК

Подробная блок-схема работы ПК РОУЗ приведена на рисунках 3.2— 3.5.

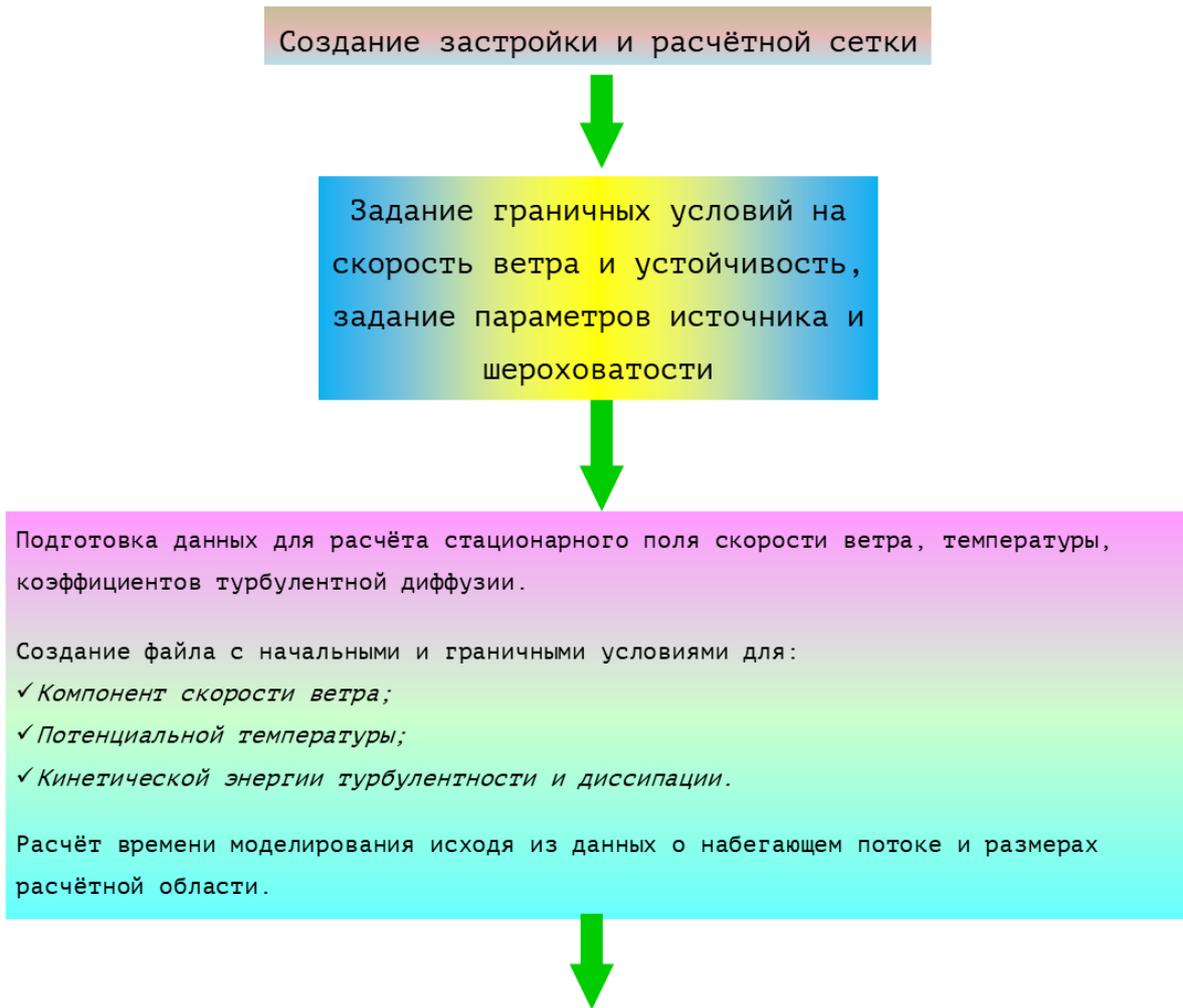


Рисунок 3.2. Блок-схема ПК РОУЗ (часть 1)

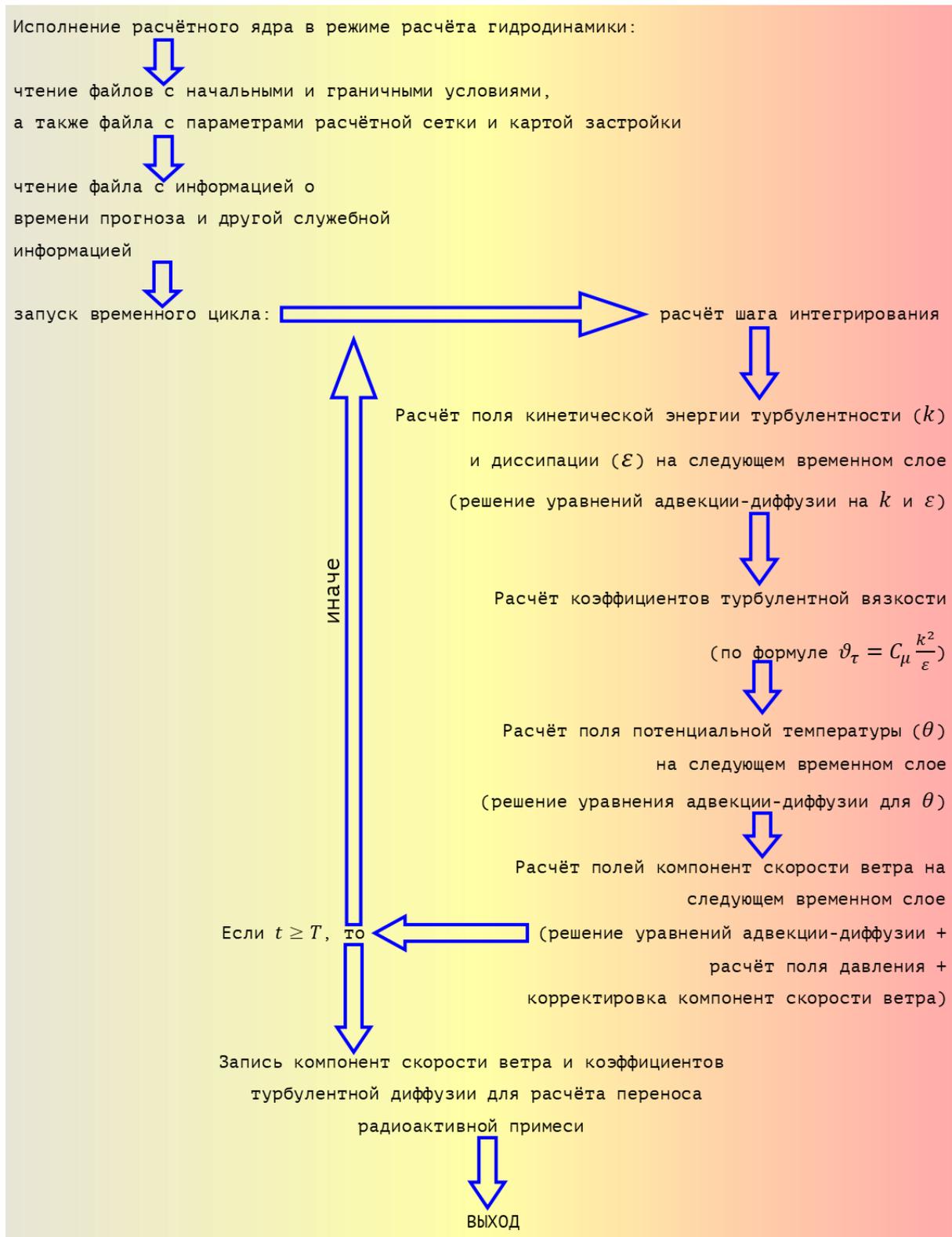


Рисунок 3.3. Блок-схема ПК РОУЗ (часть 2)

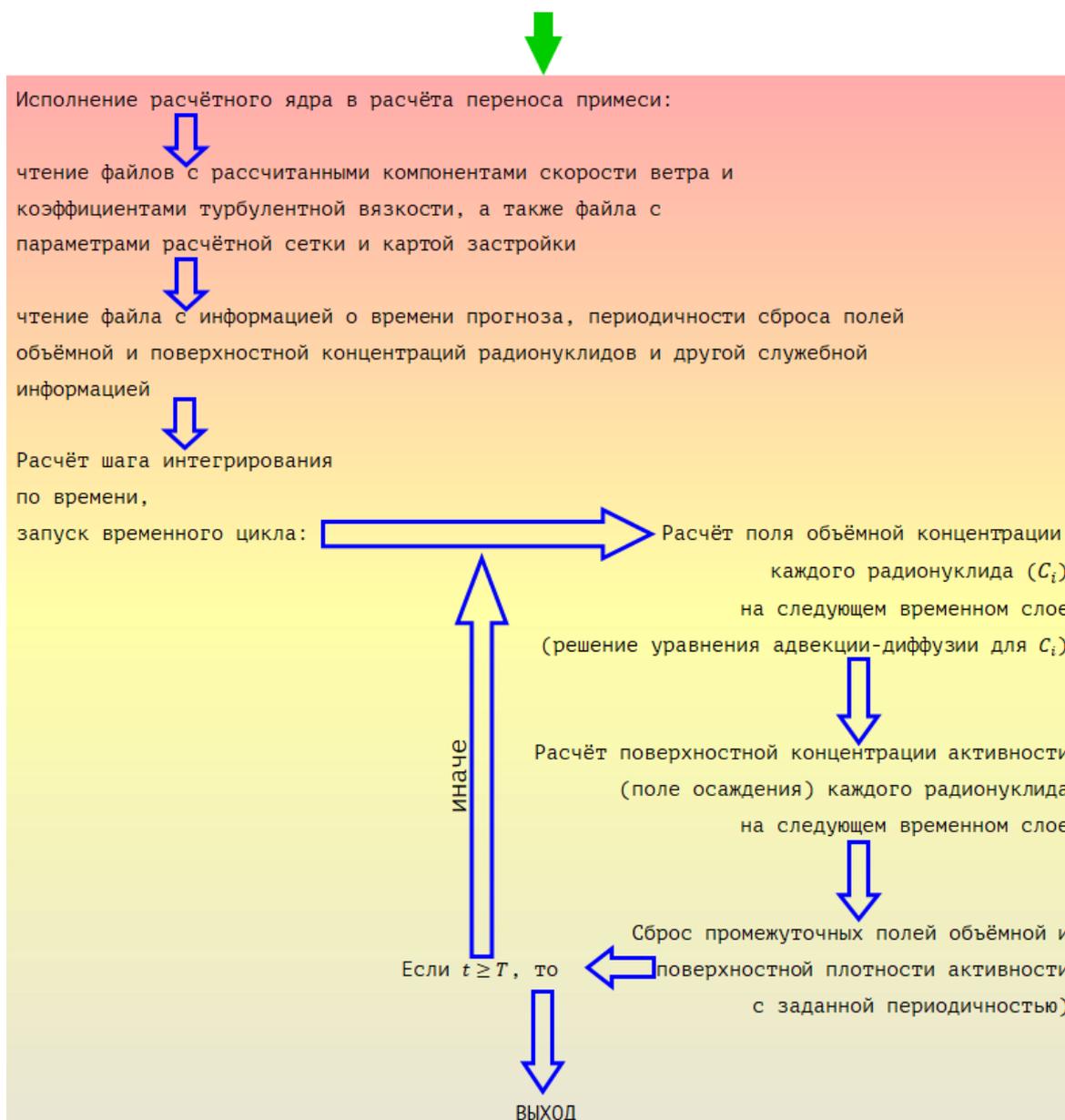


Рисунок 3.4. Блок-схема ПК РОУЗ (часть 3)



Запуск дозиметрического модуля
(ингаляции, облако, загрязнённая поверхность):

Цикл по всем моментам времени сброса полей данных:

запускается модуль расчёта мощностей доз в
каждой ячейке приземного расчётного слоя
в параллельном режиме (для каждой
расчётной ячейки запускается модуль
расчёта матрицы видимости)

Цикл завершается, когда рассчитаны мощности дозы
для каждого момента времени сброса

Запускается модуль расчёта интегральной дозы:

Цикл по всем моментам времени сброса полей данных:

запускается модуль интегрирования мощностей доз по времени
(шаг интегрирования по времени равен шагу сброса)

Цикл завершается, когда рассчитаны интегральные дозы
для каждого момента времени сброса



Запуск постпроцессора «Симулятор» для визуализации мощностей доз облучения,
интегральных доз облучения по всем путям, полей скорости ветра, осаждения
радионуклидов и других данных

Рисунок 3.5. Блок-схема ПК РОУЗ (часть 4)

3.4. Набор входных и выходных данных

К входным данным ПС РОУЗ относятся:

- геометрические данные об объекте;
- метеорологические данные;
- данные об источнике радионуклидов.

На основе данных о трехмерной геометрии объекта необходимо построить трехмерную модель объекта в формате STL, широко используемом для этих целей. Модель можно построить внутри ПК РОУЗ. Это можно сделать в препроцессоре – *GeometryEditor* (работа с которым описана далее) из специальных масштабируемых заготовок простейших геометрических форм, специальных заготовок домов разного типа и некоторых специальных объектов (градирня). Предусмотрены различные операции с этими объектами. Так же можно воспользоваться любым файлом в формате STL, созданным при помощи любого другого программного продукта, предназначенного для этих же целей.

Необходимы следующие метеорологические данные:

- скорость ветра на высоте 10 м;
- приземная температура;
- класс стабильности (классификация по Тернеру с поправками [4]).

Для определения класса устойчивости можно опираться на описанную ниже методику, требующую стандартной информации с метеорологических станций сети наблюдений РОСКОМГИДРОМЕТА [4].

Краткая характеристика классов устойчивости по Тернеру с поправками приведена в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Классы устойчивости по Тернеру с поправками

1	Очень неустойчивая
2	Умеренно неустойчивая
3	Слабо неустойчивая
4	Безразличная
5	Слабо устойчивая
6	Умеренно устойчивая
7	Очень устойчивая

Если класс устойчивости не известен, то для его определения можно воспользоваться методикой, приведенной в подразделе 2.8.

Данные об источнике нужно вводить следующим образом. Необходимо задать общую активность выброса для каждого радионуклида (в Бк для радиоактивных выбросов и в произвольных единицах для других промышленных выбросов). Кроме того, нужно задать временную динамику выброса, то есть кусочно-линейную зависимость относительной интенсивности выброса от времени. Интеграл под кусочно-линейной функцией не обязан равняться единице, а может быть равен произвольному положительному значению. Правильная нормировка относительной интенсивности выброса будет произведена на этапе записи входного файла *par.inp*. Выброс может содержать разные радионуклиды, которые выбираются из списка. Источник в текущей версии точечный.

Основная входная информация, необходимая для проведения расчетов хранится в следующих файлах:

- «stlinp.stl» — текстовый файл, описывающий поверхность трехмерного объекта(ов) застройки в стандартном формате STL. Файл содержит информацию о последовательности треугольников, из которых состоят поверхности трехмерных объектов застройки. Файл создается на этапе создания трехмерной модели объекта.
- «Par.script» — бинарный файл, создаваемый после задания сценария задачи атмосферной дисперсии примеси. Содержит всю необходимую начальную информацию для решения задачи гидротермодинамики и задачи переноса (и осаждения) примеси: направление и скорость ветра, радионуклидный состав источника и временной профиль интенсивности выброса, координаты источника выброса, температурный градиент в невозмущенной атмосфере, шероховатость подстилающей поверхности и поверхности зданий. Считывается в программе Simulator при загрузке сценария.
- «mapf3d.inp» — текстовый файл, содержащий параметры расчетной сетки и карту фиктивных областей. Считывается в вычислительном ядре и используется при интегрировании уравнений переноса импульса, температуры и примеси.

К основным выходным данным ПС РОУЗ относятся:

- компоненты векторного поля скоростей ветра в ячейках расчетной сетки в разные моменты времени. Одновременно являются входными данными для расчета адвекции-диффузии примесей;
- объемные концентрации каждого радионуклида;
- плотность поверхностных выпадений для каждого радионуклида;
- мощность дозы и интегральные дозы облучения (от облака, поверхности и ингаляции) во всех приземных приповерхностных ячейках расчетной сетки (в горизонтальном сечении).
- мощность дозы и интегральная доза в зависимости от времени при перемещении по произвольной траектории в приземном горизонтальном слое.

Результаты моделирования записываются в двух форматах: текстовом и бинарном (неформатированном). С бинарными файлами работает часть ПС РОУЗ *Simulator*, который позволяет просмотр результатов моделирования. Кроме того, выходные данные записываются в текстовом формате.

Компоненты скорости ветра, температура воздуха, объемная и поверхностная концентрация радиоактивной примеси сохраняются в неформатированном виде, то есть в бинарных файлах. Трехмерные поля объемной концентрации радионуклидов (Бк/м³) и температуры представляются в виде изоповерхностей в пространстве или цветной карты в плоском сечении. Цветные карты и изоповерхности строятся в соответствии с заданной пользователем легендой. Поверхностная концентрация радиоактивной примеси визуализируется в виде окрашенной (также в соответствии с заданной легендой) поверхности объектов застройки. Поле скорости ветра визуализируется в плоскости любой ориентации (перпендикулярно одной из координатных осей) и положения.

Возможно измерение трехмерных полей концентрации, температуры, скорости ветра путем перемещения курсора — специального объекта в программе *Simulator*, предназначенного, в частности, для выдачи информации о временной и пространственной динамике полей концентрации, температуры, скорости ветра.

Список основных выходных файлов с кратким описанием:

- «xyz.sim» — бинарный файл, хранящий информацию о расчетной сетке (размерности, координаты узлов). Файл считывается программой визуализации результатов расчета *Simulator*.
- «uvw.sim» — бинарный файл, хранящий трехмерный массив компонент скорости ветра, рассчитанных на этапе решения гидротермодинамической задачи.
- uvrt.dat — бинарный файл, в котором содержатся трехмерные массивы компонент скорости ветра, температуры, давления (точнее его отклонения от гидростатического) — результат решения гидротермодинамической задачи. Этот файл сначала генерируется программой инициализации расчета гидротермодинамической задачи и содержит начальное приближение (начальные условия) на трехмерное поле компонент скорости ветра, давление и температуру. На этапе расчета гидротермодинамической задачи этот файл является входным, хранящиеся в нем значения в вычислительном ядре интерпретируются как начальные приближения вышеупомянутых трехмерных полей. По завершении этого этапа файл перезаписывается и хранит уже конечные трехмерные поля — результат решения гидротермодинамической задачи с заданными граничными условиями. На этапе расчета переноса радиоактивной примеси хранящиеся в этом файле поля компонент скорости ветра интерпретируются вычислительным ядром как входные данные для задачи адвекции примеси.
- «3d.dat» — текстовый (форматированный) файл, содержащий в формате TecPlot трехмерные поля компонент скорости ветра, давления, и температуры.

- «с_0001.sim, с_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, в которых содержатся трехмерные поля объемной концентрации каждого, заданного на этапе подготовки сценария выброса, радионуклида. Каждый файл хранит информацию о распределении концентраций в определенный модельный момент времени и значение этого момента. Чем больше порядковый номер в имени файла, тем больше значение модельного времени. Количество файлов зависит от времени прогноза распространения и периода сброса в файлы, заданного на том же этапе подготовки сценария. Период модельного времени, с которым текущие поля концентраций сбрасываются в файлы данного вида, равен периоду сброса. Эти файлы считываются программой *Simulator* в процессе хода модельного времени.
- «t_0001.sim, t_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, аналогичные файлам «с_0001.sim», «с_0002.sim» и т. д. соответственно, но хранящие трехмерные поля температуры вместо концентраций. Следует заметить, что в текущей версии температура остается постоянной в процессе расчета переноса. Само трехмерное поле является решением гидротермодинамической задачи, и поэтому не изменяется на этапе переноса. Эти файлы так же считываются программой *Simulator* в процессе хода модельного времени.
- «pl_0001.sim», «pl_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, аналогичные описанным выше, но хранящие значения поверхностной концентрации радионуклидов на подстилающей поверхности. Каждый элемент поверхности представляет собой треугольник в пространстве. В файле содержатся координаты вершин каждого треугольника и значение поверхностной концентрации на нем. Считываются аналогично описанным выше в программе *Simulator*. В этой программе используются при визуализации поля осаждения.
- «d_pl_0001.sim», «d_pl_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, абсолютно повторяющие по содержанию файлы «pl_0001.sim», «pl_0002.sim» и т. д. соответственно. Но используются эти файлы для расчета мощности доз облучения от подстилающей поверхности.
- «os_0001.sim», «os_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, аналогичные набору файлов «pl_0001.sim», «pl_0002.sim» и т. д., но содержащие информацию о поверхностной концентрации радионуклидов на триангулированной поверхности входных объектов застройки, созданной на этапе построения модели в геометрическом редакторе *GeometryEditor*. Считываются в программе *Simulator* в процессе хода таймера модельного времени. Служат для визуализации поля загрязнения поверхностей объектов.
- «d_os_0001.sim», «d_os_0002.sim» и т. д. — бинарные файлы, аналогичные набору файлов «os_0001.sim», «os_0002.sim» и т. д., но содержащие информацию о поверхностной концентрации радионуклидов на триангулированной поверхности объектов застройки, построенных на основе карты фиктивных областей. Такие поверхности отражают не реальную, а модельную — ступенчатую, геометрию застройки. Модельная геометрия может в деталях существенно отличаться от оригинальных входных объектов, на основе которых вычисляется сама карта фиктивных областей. Однако для крупных элементов застройки, существенно влияющих на картину течения, это искажение не имеет значения. Файлы считываются в программе *Simulator*, аналогично описанным выше. Служат для расчета мощности дозы облучения от поверхности модельной застройки.

3.5. Подготовка данных для расчета

3.5.1. Программная оболочка

ModelFramework — программа-оболочка для запуска препроцессинга, вычислительного ядра, постпроцессинга задачи расчета гидротермодинамики и переноса радиоактивного загрязнения в условиях произвольной трехмерной геометрии объекта, расчет мощности дозы и доз, полученных за определенный промежуток времени.

На этапе подготовки данных для расчета, необходимо создать или считать готовую трехмерную модель объекта.

В основе схемы работы программного комплекса стоит двухуровневая древовидная система данных:

- Первый уровень — геометрическая модель или данные, полностью описывающие трехмерную геометрию гидротермодинамической задачи и задачи переноса радиоактивной примеси. Содержит информацию о расчетной сетке, а также о содержании расчетной области различными трехмерными объектами произвольной сложности, которые аппроксимируются в вычислительном ядре множеством твердых непроницаемых ячеек расчетной сетки.
- Второй уровень — список сценариев для некоторой модели, состоящий из произвольного числа элементов, каждый из которых содержит всю необходимую информацию для проведения расчета как гидротермодинамической задачи, так и задачи переноса и осаждения примеси, сверх данных, описывающих геометрию задачи. Данные сценария содержат различную информацию об условиях распространения радиоактивной примеси.

Каждая модель расположена в отдельной директории. Каждая такая директория расположена в папке Models\. Внутри директории модели расположены сценарии, каждый из которых также расположен в отдельной директории. Все данные — как модели, так и сценарии — хранятся в виде одного или нескольких файлов.

Через интерфейс данной программы осуществляется:

- запуск программы создания моделей (*GeometryEditor* — Геометрический редактор);
- запуск программы создания сценариев (*EditInp* — редактор сценариев);
- запуск вычислительного ядра (версия CONV-3D для атмосферного переноса);
- запуск постпроцессинга (программы *Simulator* — визуализатор результатов расчета).

С левой стороны окна программы расположено двухуровневое дерево: на первом уровне модели, на втором — сценарии для этой модели. С помощью курсора «мыши» можно выбирать модели и соответствующие этой модели сценарии.

Интерфейс содержит следующие опции:

- группа элементов «Работа с моделью» содержит:
 - 1) кнопка «Удалить» служит для удаления модели и всех, связанных с ней сценариев;
 - 2) кнопка «Просмотр/редактирование» служит для запуска программы *GeometryEditor* с загрузкой выбранной модели. Возможна модификация ранее созданной модели;
 - 3) кнопка «Создать» служит для запуска программы *GeometryEditor* с созданием новой модели. При этом по умолчанию в созданной папке модели создается файл геометрии *Geometry.e3d*. Средствами редактора создается требуемая геометрия. Расчетная сетка записывается в файл *mapf3d.inp* папки модели. Также создаются файлы, необходимые для постпроцессинга-визуализатора (*Simulator*), создается файл *stlinp.stl*, содержащий трехмерные объекты расчетной области в виде треугольников. В папке модели создается полный комплект необходимых для постпроцессинга файлов.
- Группа элементов «Работа со сценарием» содержит:
 - 4) кнопка «Удалить» служит для удаления выбранного сценария выбранной модели;
 - 5) кнопка «Просмотр/редактирование» служит для запуска программы *EditInp* с загрузкой выбранного сценария. Возможна модификация ранее созданного сценария;
 - 6) кнопка «Создать» служит для запуска программы *EditInp* с созданием нового сценария.

При создании новой модели или сценария пользователю предлагается ввести его псевдоним в специальном окне, изображенном на рисунке 3.6.

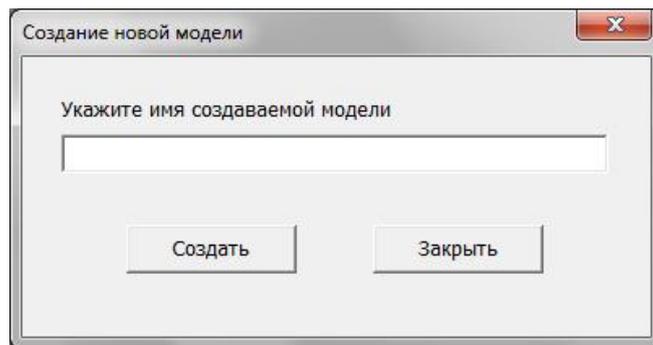


Рисунок 3.6. Окно «Создание новой модели»

- кнопка «*Запуск*» служит для старта программ вычислительного ядра;
- кнопка «*Визуализация*» служит для старта программы-постпроцессинга *Simulator*, которая позволяет визуализировать результаты работы вычислительного модуля.

Кнопка «*Справка*» служит для вызова текущей справки, в которой приводится пошаговая инструкция по подготовке данных для расчетов с помощью ПС РОУЗ.

3.5.2. Ввод исходных данных по геометрии задачи

Для проведения любого расчета, необходимо в качестве первого шага создать геометрическую модель расчетной области и объекта, с помощью встроенного в оболочку *GeometryEditor*. Возможно использование любого готового файла в стандартном формате STL (для геометрических трехмерных моделей объектов), полученного с применением любых сторонних пакетов, предназначенных для тех же целей.

GeometryEditor — это часть ПС, предназначенная для редактирования трехмерных замкнутых объектов в декартовой системе координат в ограниченном пространстве и последующего создания расчетной сетки для расчета задач гидротермодинамики.

Все длины в данном ПС измеряются в метрах, а углы — в градусах.

Значения терминов, используемых далее

Сцена — это прямоугольный параллелепипед в трехмерном пространстве, стороны которого параллельны осям координат, а так же все трехмерные объекты, содержащиеся в нем. В качестве примера рассмотрим рисунок 3.7, на котором изображена сцена с макетом ЛАЭС-2.

В *GeometryEditor* (как это показано на рисунке 3.7) стороны этого прямоугольного параллелепипеда изображаются белым цветом. Грани этого параллелепипеда не изображаются (абсолютно прозрачны). Он ограничивает расчетную область, которая передается в блок расчета гидротермодинамики. Поэтому сценой в данном случае является параллелепипед и макет станции.

Расчетная сетка — это совокупность узлов расчетной сетки в трехмерной декартовой системе координат, то есть совокупность троек чисел (x_i, y_j, z_k) , где i, j, k — индексы расчетной ячейки вдоль соответствующих направлений, перебираемые независимо друг от друга. Все граничные узлы расчетной сетки лежат на соответствующих гранях прямоугольного параллелепипеда, ограничивающего сцену.

Карта сцены — это подмножество узлов расчетной сетки, каждый элемент которого (узел) находится внутри какого-либо трехмерного объекта сцены. Точка в трехмерном пространстве, заданная своим радиус-вектором, находится внутри какой-либо замкнутой поверхности, если любая прямая, проходящая через эту точку, пересекает замкнутую поверхность четное число раз. Данное определение используется при построении карты (фиктивных областей). В соответствии с этим определением все узлы расчетной сетки делятся на 2 категории: внутри и вне объектов.

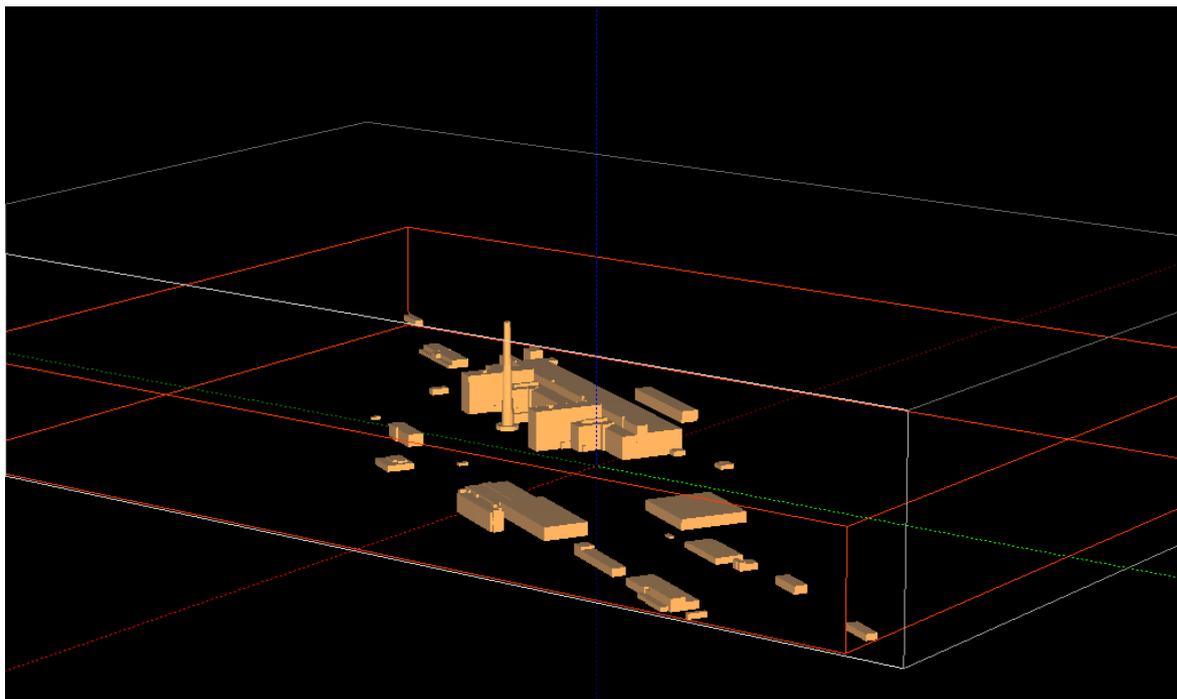


Рисунок 3.7. Сцена с макетом ЛАЭС-2 в GeometryEditor

Если узел оказался внутри какого-либо объекта, то ему присваивается свойство «фиктивный». Узлам, которые находятся вне объектов, присваивается свойство «воздушный». В блоке расчета гидротермодинамики, в который передается сформированная в *GeometryEditor* сетка и карта, общая грань 2 смежных расчетных ячеек, принадлежащих к разным категориям, является твердой и непроницаемой (а также шероховатой), ориентированной к воздушной ячейке.

Маркировка — процесс создания карты (фиктивных областей).

Габаритный каркас (трехмерного объекта) — это прямоугольный параллелепипед в трехмерном пространстве наименьшего размера, который полностью включает родительский трехмерный объект. Заметим, что при параллельном переносе и вращении трехмерного объекта, его габаритный каркас претерпевает те же самые преобразования. В *GeometryEditor* (как показано на рисунке выше) ребра габаритного каркаса трехмерного объекта сцены изображаются красным цветом.

Видимость/невидимость трехмерного объекта — состояние трехмерного объекта сцены, которое показывает, будет ли отображаться этот объект на сцене, а также будет ли он учтен при построении карты (фиктивных областей).

Папка модели — место расположения файлов, содержащих всю необходимую информацию для работы с трехмерной сценой. В этой папке содержатся файлы с расчетной сеткой, картой сцены, поверхности объектов сцены и другая информация.

Стандартные формы объектов — специальные заготовки в *GeometryEditor* для трехмерных объектов, размеры которых можно варьировать и компоновать из них более сложные объекты.

Основные возможности *GeometryEditor*:

- создание трехмерных сцен из стандартных форм объектов, а также из произвольных файлов, в формате STL (созданных, например, в других сторонних программах);
- редактирование параметров объектов в диалоге свойств;
- вращение и перемещение объектов вручную (с помощью мыши) и точно (путем задания вектора смещения и углов вращения в диалоге свойств);

- изменение вида на трехмерную сцену путем вращения камеры (точки обзора трехмерной сцены) относительно начала координат и приближения/отдаления от него;
- экспорт созданных трехмерных сцен в STL-файлы;
- сохранение вида трехмерных сцен в виде картиннки;
- построение расчетной сетки и ее маркировка;
- создание всех необходимых входных файлов исходной информации о геометрии объекта, для проведения расчетов задач гидротермодинамики, а также для последующей визуализации результатов расчета с помощью специальной встроенной программы *Simulator*.

GeometryEditor подразумевает наличие интегрирующей оболочки *ModelFramework* из которой, в частности, производится его запуск. Однако эту программу можно запускать и независимо от оболочки в автономном режиме. Для этого необходимо запустить исполняемый файл «GeometryEditor.exe», который находится в корневой папке программы-оболочки. При запуске из оболочки *GeometryEditor* передает путь к папке модели, где содержится файл «geometry.e3d» по умолчанию (однако файл сцены можно сохранить и под другим именем). Этот же файл перезаписывается при нажатии кнопки «Запись диалога сетки и карты».

Через пункты главного меню «Файл» можно записывать и загружать любые *.e3d файлы (проектов геометрии). При нажатии кнопки «Запись диалога сетки и карты» текущая построенная геометрия будет сохраняться в файле «geometry.e3d» в папке модели. При автономном запуске (вне оболочки *ModelFramework*), при нажатии кнопки «Запись диалога сетки и карты», запись файлов производится в подпапку /tmp папки, в которой находится исполняемый файл «GeometryEditor.exe».

GeometryEditor содержит главное окно, изображенное на рисунке 3.8 и диалог «Сетка и карта» (всегда располагаемый сверху), изображенный на рисунке 3.9, а также вспомогательные диалоги (атрибуты объектов, выбор файла, выбор цвета и т. д.).

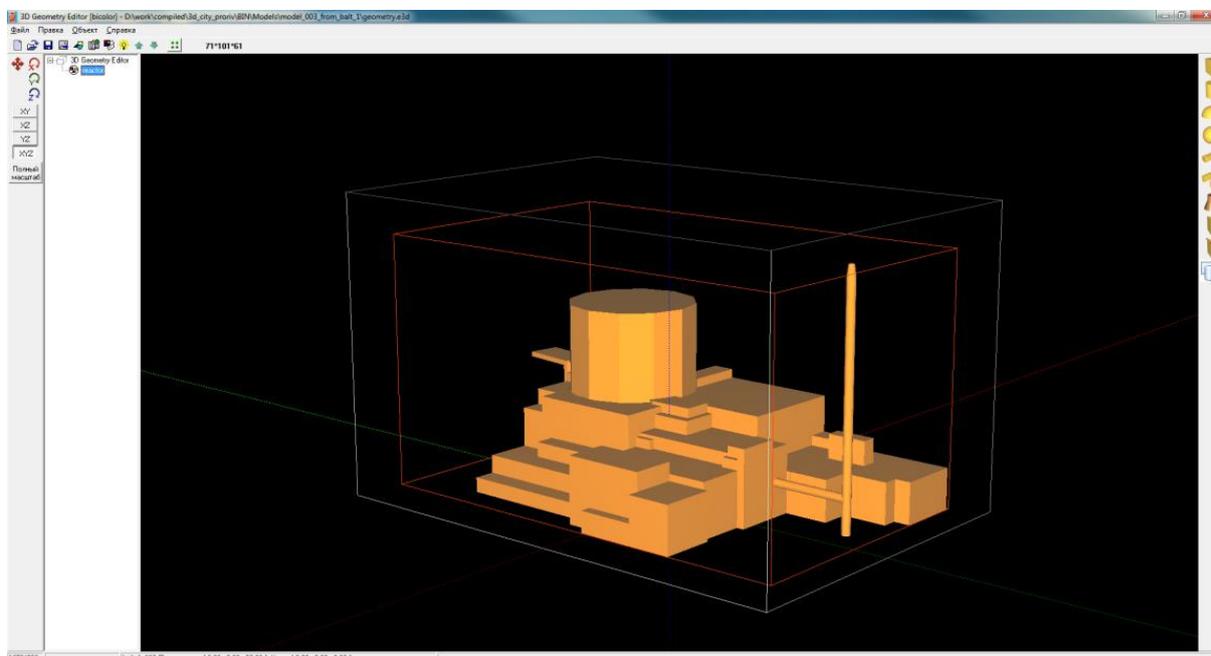


Рисунок 3.8. Главное окно программы *GeometryEditor*



Рисунок 3.9. Диалог «Сетка и карта»

3.5.3. Компоненты главного окна

На рисунке 3.10 изображена одна из типичных конфигураций главного окна, основные компоненты которого это:

- меню;
- стандартная панель инструментов;
- панель управления;
- дерево объектов;
- панель образа;
- панель стандартных объектов;
- строка состояния.

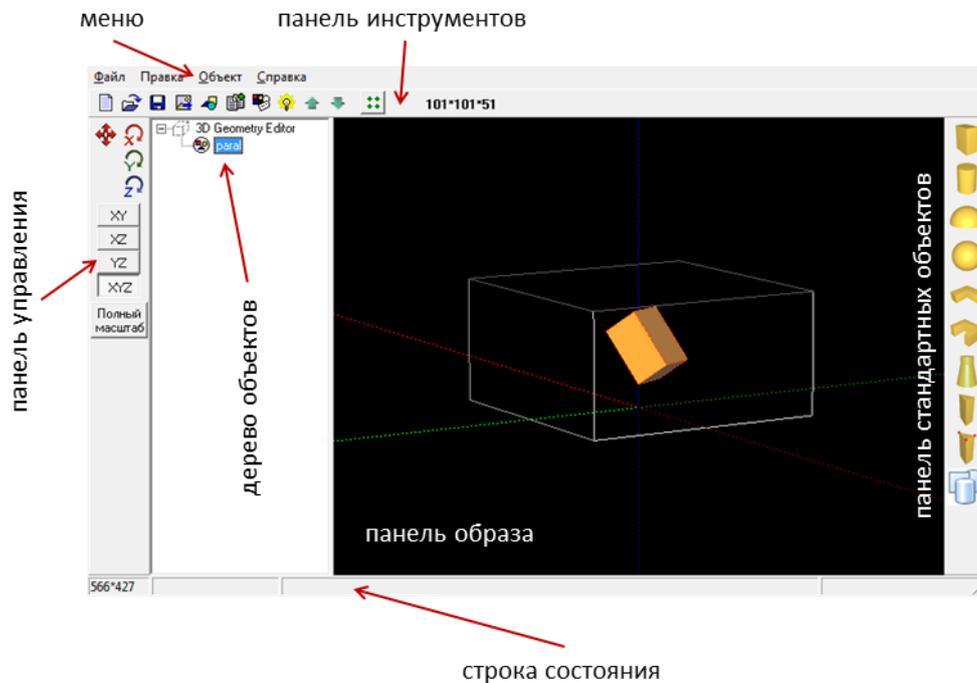


Рисунок 3.10. Главное окно GeometryEditor с пояснениями

Меню

Программа содержит следующие пункты меню.

Пункт меню «*Файл*» состоит из следующих команд:

-  «*Новый*» — создание нового трехмерного проекта. Первоначально на панели образа отображается расчетная область по умолчанию (контейнер *GeometryEditor*) где будут размещены все геометрические объекты сцены. Размер расчетной области (контейнера) может быть изменен (см. далее);
 -  «*Открыть*» — загружает ранее созданные трехмерные проекты, сохраненные в файлах *.e3d. Пункт меню «*Файл*» содержит список недавно открытых файлов (до 9);
 -  «*Сохранить*» — сохраняет изменения в трехмерном проекте в файле *.e3d. Если открытый файл уже существовал, то эта команда просто сохраняет изменения в нем. Если это новый проект, то открывается диалоговое окно сохранения файла. Имя сохраненного файла отображается в заголовке главного окна;
 -  «*Сохранить как*» — сохраняет изменения в трехмерном проекте в файле *.e3d. Пользователь задает имя файла в диалоговом окне сохранения файла. Имя сохраненного файла отображается в заголовке главного окна. В отличие от команды *Файл/Сохранить*, эта команда позволяет сохранять уже существующие файлы под другим именем;
 -  «*Копировать образ в буфер*» — копирует созданную трехмерную сцену в буфер обмена в графическом формате bmp. Это изображение можно вставить в любой графический редактор или документ, поддерживающий вставку рисунков;
 -  «*Сохранить образ в файл*» — сохраняет созданную трехмерную сцену в графический файл (в один из форматов: bmp, jpg, gif, png, tif, tga);
 -  «*Экспорт геометрии в STL*» — сохраняет сцену (все видимые трехмерные объекты) в текстовом файле в стандартном формате STL (в виде списка ориентированных треугольников); имя файла задается в стандартном диалоге сохранения файла;
 -  «*Экспорт карты в TescPlot*» — сохраняет карту в текстовом файле в формате DAT (для программы *TescPlot*); имя файла задается в диалоге сохранения файла;
 -  «*Настройки*» — редактирование настроек программы;
 -  «*Выход*» — закрыть программу;
- 7) Пункт меню «*Правка*» состоит из следующих команд;
- «*Отменить*» — отменить последнюю операцию редактирования трехмерной сцены;
 - «*Повторить*» — выполнить последнюю отмененную операцию редактирования трехмерной сцены (отмена отмены);
 - Пункт меню «*Объект*» состоит из следующих команд;
 -  «*Дублировать*» — дублирует (создает точную копию) выбранного объекта. Также можно нажать на выделенном элементе дерева правой кнопкой «мыши» и выбрать из контекстного меню пункт «*Дублировать*»;
 -  «*Удалить*» — удаляет выбранный объект из дерева объектов и трехмерной сцены. Также можно нажать на выделенном элементе дерева правой кнопкой «мыши» и выбрать из контекстного меню пункт «*Удалить*»;
 -  «*Редактировать*» — редактирует выбранный объект. Вы можете выбрать нужный объект на сцене с помощью «мыши» и клавиши Ctrl, при этом он выделится в Дереве объектов. Или сразу выбрать нужный объект из дерева. Для вызова диалога редактирования свойств

выбранного объекта используется пункт контекстного меню «*Редактировать*». Тот же эффект достигается двойным щелчком левой кнопки «мыши» по имени объекта в дереве объектов. Для каждого типа объекта открывается свой вариант диалога редактирования;

-  «*Показать/скрыть*» — делает невидимым (видимым) на «*Панели образа*» любой объект, выбранный из «*Дерева объектов*». Также для этого можно использовать пункт контекстного меню «*Показать/скрыть*» или клавишу пробела. Если выбран верхний корневой объект 3D *GeometryEditor*, то признак видимости меняется для всех объектов сцены на противоположный (видимые объекты станут невидимыми и наоборот);
-  «*Вверх*» — перемещает выбранный объект вверх по «*Дереву объектов*». Также можно нажать на выбранном элементе дерева правой кнопкой «мыши» и выбрать из контекстного меню пункт «*Вверх*»;
-  «*Вниз*» — перемещает выбранный объект вниз по «*Дереву объектов*». Также можно нажать на выбранном элементе дерева правой кнопкой «мыши» и выбрать из контекстного меню пункт «*Вниз*»;
-  «*Операция*» — вызывает диалог операций для формирования нового объекта как комбинации двух объектов сцены;
-  «*Цвет фона*» — задает цвет фона «*Панели образа*».

Пункт меню «*Справка*» состоит из одной команды —  «*Справка*», вызывающую справку для текущего окна.

Панель инструментов

Панель инструментов *GeometryEditor* представлена на рисунке 3.11.



Рисунок 3.11. Панель инструментов *GeometryEditor*

Панель инструментов состоит из нескольких кнопок, дублирующих наиболее часто используемые команды главного меню. При нажатии на какую-либо кнопку этой панели выполнится соответствующая команда главного меню. Так кнопка  скрывает/активирует диалоговое окно «*Сетка и карта*».

Панель управления

Панель предназначена для задания ориентации и положения объектов в пространстве и выбора вида проекции. Кнопка  предназначена для сдвига объекта по осям X, Y, Z в ортогональных проекциях. На рисунках 3.12, 3.13 приведен оригинальный и смещенный объекты.

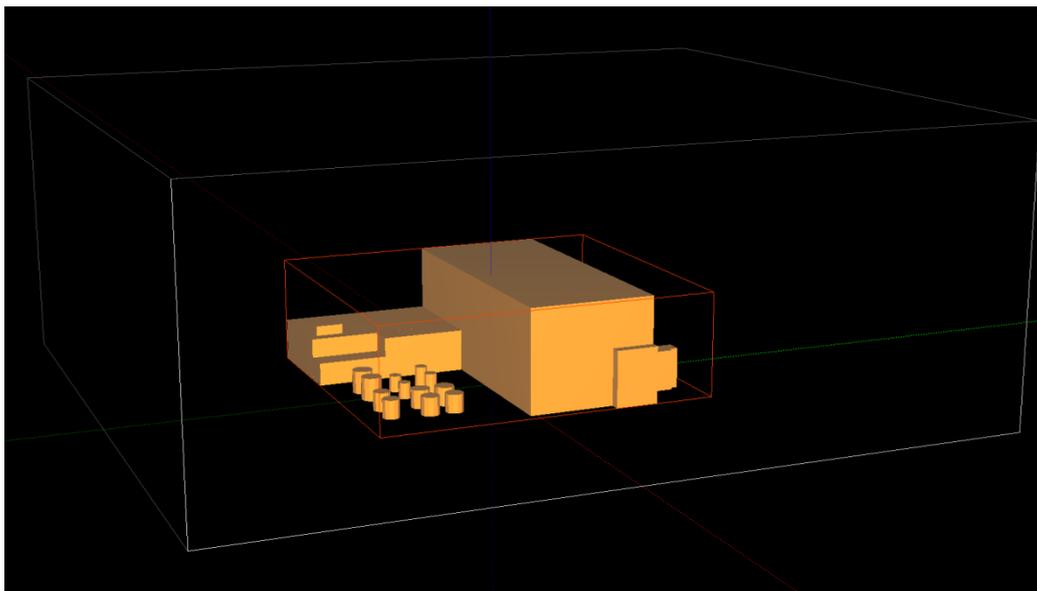


Рисунок 3.12. Оригинальный STL объект

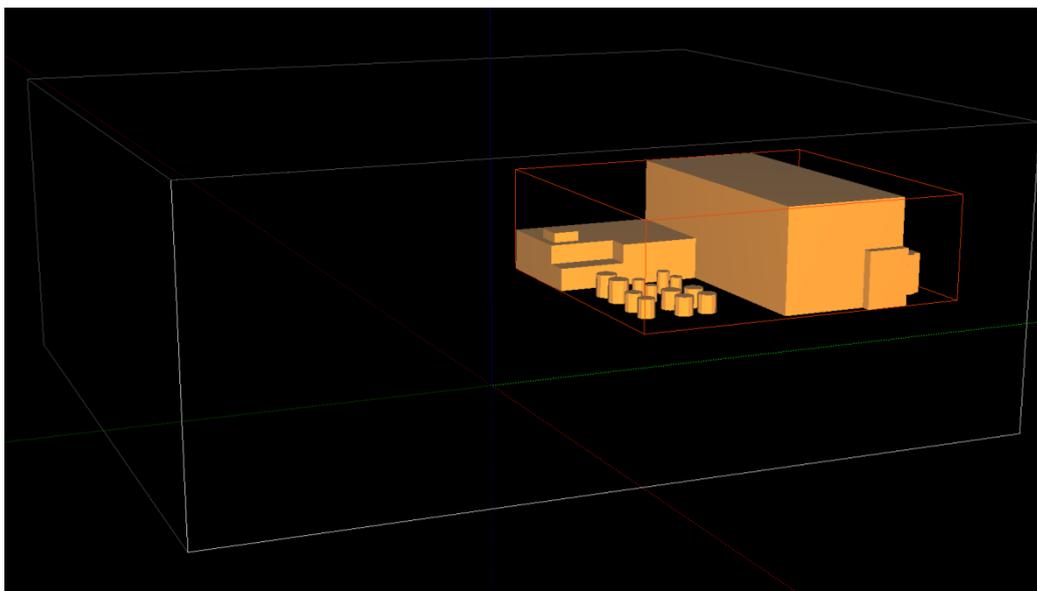


Рисунок 3.13. Сдвинутый в пространстве STL объект

Кнопки , ,  предназначены для поворота объекта вокруг осей X, Y, Z соответственно. Заметим, что последовательность операций вращения вокруг осей X, Y и Z некоммукативна по своей математической природе. Это значит, что результат последовательных вращений вокруг разных осей зависит от порядка вращений. В ПС РОУЗ принята следующая последовательность вращений: сначала вокруг оси X, потом — вокруг Y, в последнюю очередь — вокруг Z.

На рисунках 3.14, 3.15 приведены повернутый вокруг оси X на 20° , и вокруг оси Y на 40° объект.

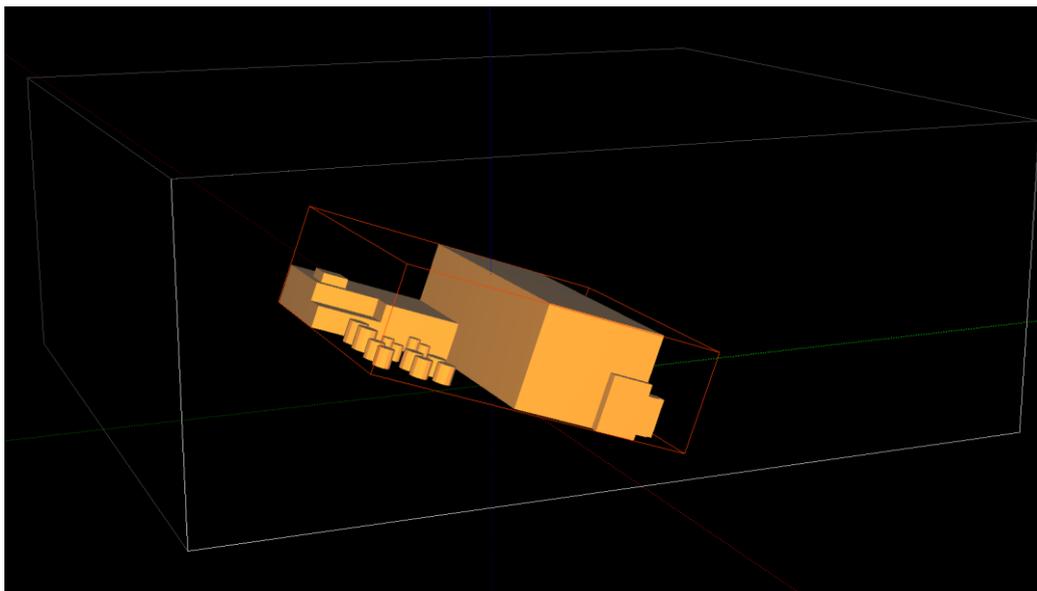


Рисунок 3.14. STL объект после поворота вокруг оси X

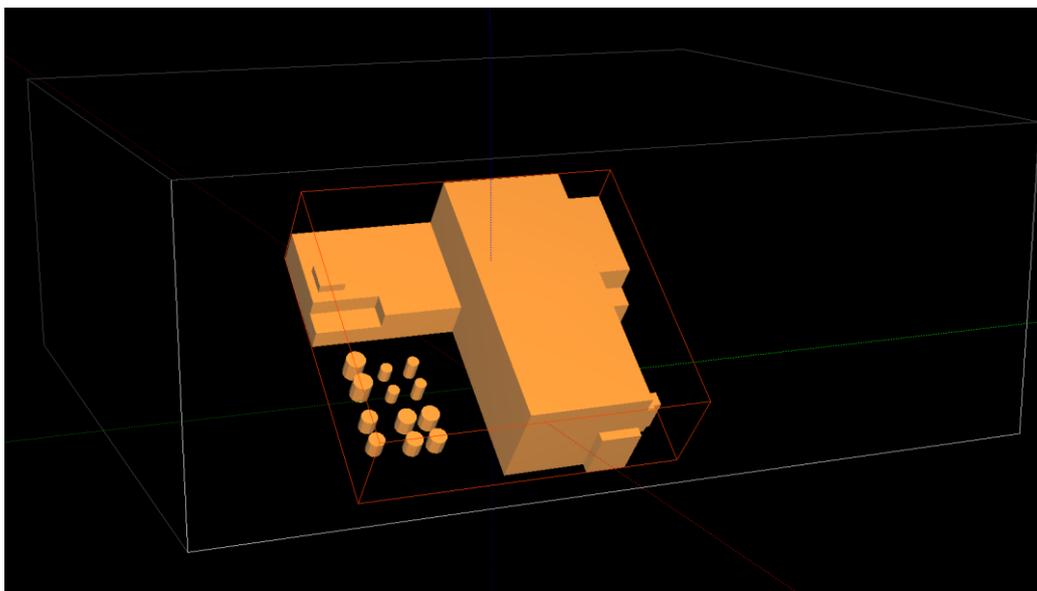


Рисунок 3.15. STL объект после поворота вокруг оси Y

Группа кнопок XYZ, XY, XZ, YZ задают вид проекции: перспективная или ортогональная по одной из трех плоскостей. Кнопка «*Полный масштаб*» масштабирует трехмерный образ так, чтобы были видны все объекты. При выборе текущего объекта на сцене он выделяется при помощи красного габаритного каркаса.

Дерево объектов

«*Дерево объектов*», пример которого приведен на рисунке 3.16, предназначено для отображения имен объектов, входящих в трехмерную сцену.

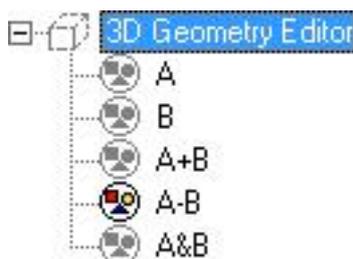


Рисунок 3.16. Пример «Дерева объектов»

«Дерево объектов» не включает такие вспомогательные объекты, как:

- расчетная область, отображаемая на сцене в виде каркасного прямоугольника белого цвета;
- карта, отображаемая на сцене в виде белых точек;
- каркасный прямоугольник выделенного объекта (красного цвета).

Двойной щелчок «мышью» на имени объекта вызывает диалог редактирования атрибутов объекта. Вызов контекстного меню в дереве объектов, (нажатием правой кнопки «мыши») для выбранного объекта, дублирует пункты «Объект» из главного меню.

Панель образа

«Панель образа» расположена в центральной части главного окна и занимает наибольшую площадь главного окна. На рисунке 3.17 — это область с черным фоном, в котором изображены объекты трехмерной сцены.

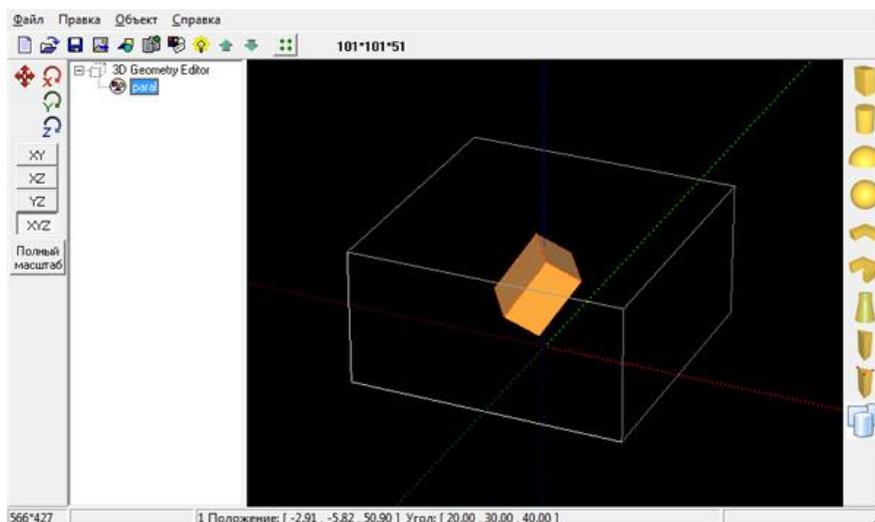


Рисунок 3.17. Пример «Панель образа»

Она предназначена для визуального отображения создаваемой трехмерной сцены. Ее размеры можно изменить с помощью «мыши», они отображаются в «Строке состояния». На панели образа показаны оси координат, совпадающие с координатными осями расчетной области. Цвет осей: X — красный, Y — зеленый, Z — синий. Вид на созданную сцену можно изменять.

Можно приближать и отдалять «камеру» для достижения нужного вида путем перемещения указателя «мыши» по горизонтали (вправо — приближение, влево — отдаление) при условии, что нажата комбинация клавиш: Ctrl+Shift+левая кнопка «мыши». Более простой способ сделать это — вращение колесика «мыши».

Можно изменять положение камеры (и соответственно вида сцены) путем вращения ее либо вокруг оси Z, либо вокруг оси, перпендикулярной оси Z. Для этого необходимо при нажатой клавише «Shift+левая кнопка «мыши» перемещать указатель «мыши» вверх-вниз для вращения

вокруг оси, перпендикулярной оси Z, вправо-влево для вращения вокруг оси Z. На рисунке 3.18 изображена та же сцена, что и на рисунке 3.17, но с измененным положением «камеры».

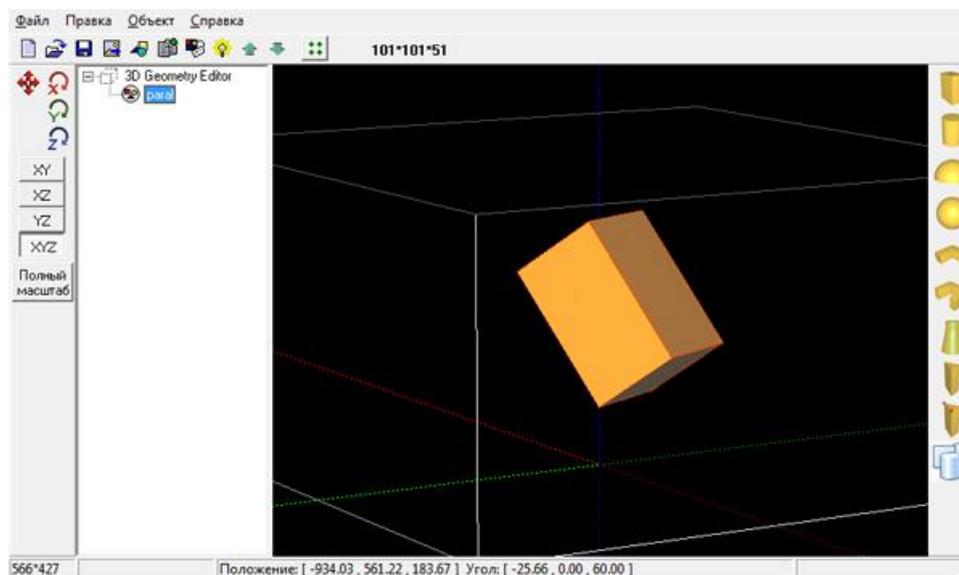


Рисунок 3.18. Вид «Панели образа» при изменении положения камеры

Изменение позиции (вектор смещения) активного объекта (который обрамлен красным габаритным параллелепипедом) на экране можно производить не только в диалоге атрибутов объекта, но и путем перемещения указателя «мыши» с нажатой левой кнопкой и зафиксированной кнопкой , находящейся на панели управления и отвечающей за вектор смещения. Результат перемещения зависит от того, какая проекция была активна в момент перемещения.

В режиме перспективной проекции (при нажатой кнопке XYZ) меняются все три компоненты вектора смещения.

В режимах ортогональной проекции, которые активируются путем нажатия соответствующей кнопки на панели управления (XY, XZ, или YZ), меняются только те две из трех компонент вектора смещения, которые представлены в данной проекции (например, в проекции XY меняются X и Y координаты вектора смещения).

Если в дереве объектов выбран верхний корневой элемент «3D GeometryEditor», то перемещение указателя «мыши» приводит к перемещению «камеры» относительно начала координат трехмерного мира, то есть не приводит к перемещению объектов сцены относительно начала координат. Такая операция изменяет лишь вид сцены, но не ее геометрические параметры; она может быть полезна, когда область не центрирована относительно нуля — в этом случае вращать сцену удобнее.

Панель стандартных объектов

Панель расположена в правой части главного окна и содержит пиктограммы вставляемых типовых объектов. При нажатии на пиктограмму появляется диалог «STL объект», который предназначен для задания атрибутов создаваемого трехмерного объекта (для объектов каждого типа диалог имеет свой вид), в котором можно задать положение, геометрические параметры, прозрачность и цвет объекта (выбирается из стандартного диалога выбора цвета при нажатии на цветной квадратик). Ниже для объектов каждого типа представлен вид этого диалога.

- Параллелепипед. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Параллелепипед» имеет вид, представленный на рисунке 3.19.

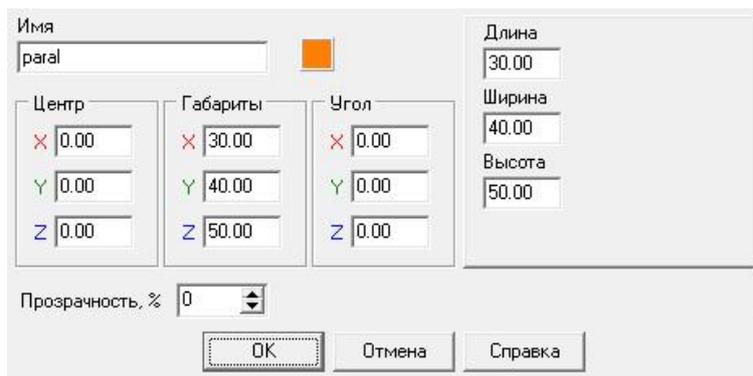


Рисунок 3.19. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Параллелепипед»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: длина, ширина и высота. Эти 3 параметра соответствуют длинам ребер прямоугольного параллелепипеда. Вид параллелепипеда с размерами 30×40×50 на сцене представлен на рисунке 3.20.

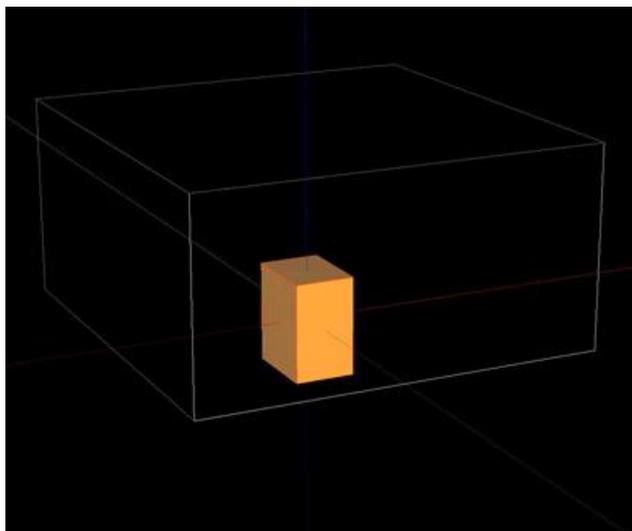


Рисунок 3.20. Пример объекта типа «Параллелепипед» на сцене

- Цилиндр. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Цилиндр», имеет вид, представленный на рисунке 3.21.

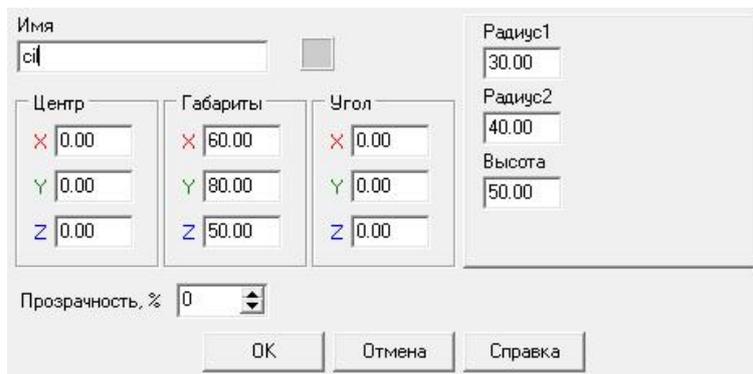


Рисунок 3.21. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Цилиндр»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: полуоси эллипса («Радиус 1» и «Радиус 2»), который лежит в основании цилиндра, и его высота («Высота»). Цилиндр, основанием которого является эллипс с полуосями 30 и 40, и высотой 50 на сцене выглядит так, как показано на рисунке 3.22.

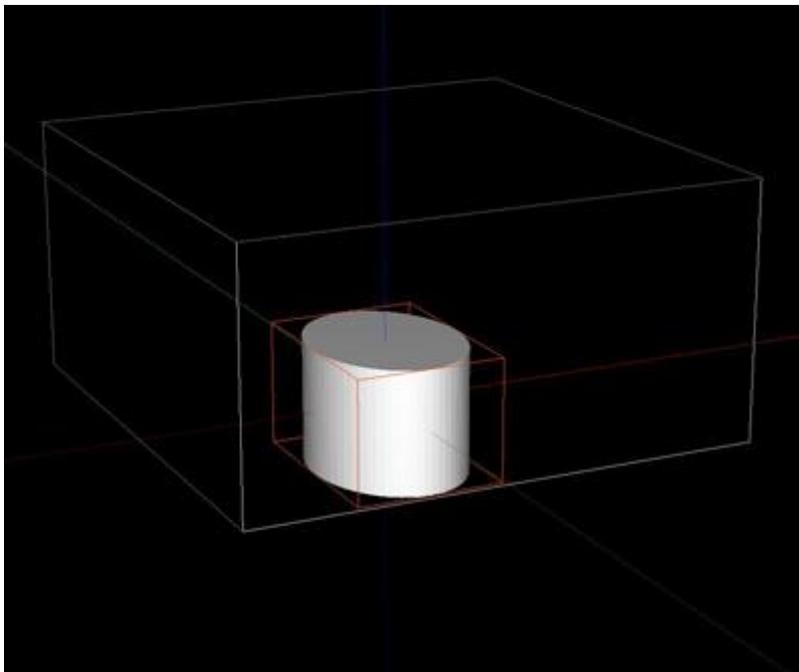


Рисунок 3.22. Пример объекта типа «Цилиндр» на сцене

- Полуэллипсоид. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Полуэллипсоид», имеет вид, представленный на рисунке 3.18.

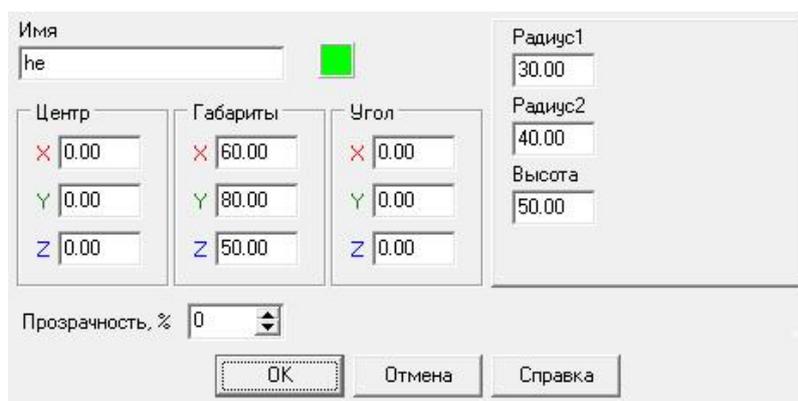


Рисунок 3.23. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Полуэллипсоид»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: полуоси исходного эллипсоида («Радиус 1», «Радиус 2», «Высота»), который является исходным объектом при построении полуэллипсоида.

Полуэллипсоид является верхней симметричной частью эллипсоида, отделенной от нижней части горизонтальным сечением, проходящим через геометрический центр эллипсоида, дополненной эллипсом с полуосями «Радиус1» и «Радиус2» в горизонтальном основании.

Пусть основанием полуэллипсоида является эллипс с полуосями 30 («Радиус 1») и 40 («Радиус 2»), а высота равна 50. Вид такого полуэллипсоида на сцене представлен на рисунке 3.24.

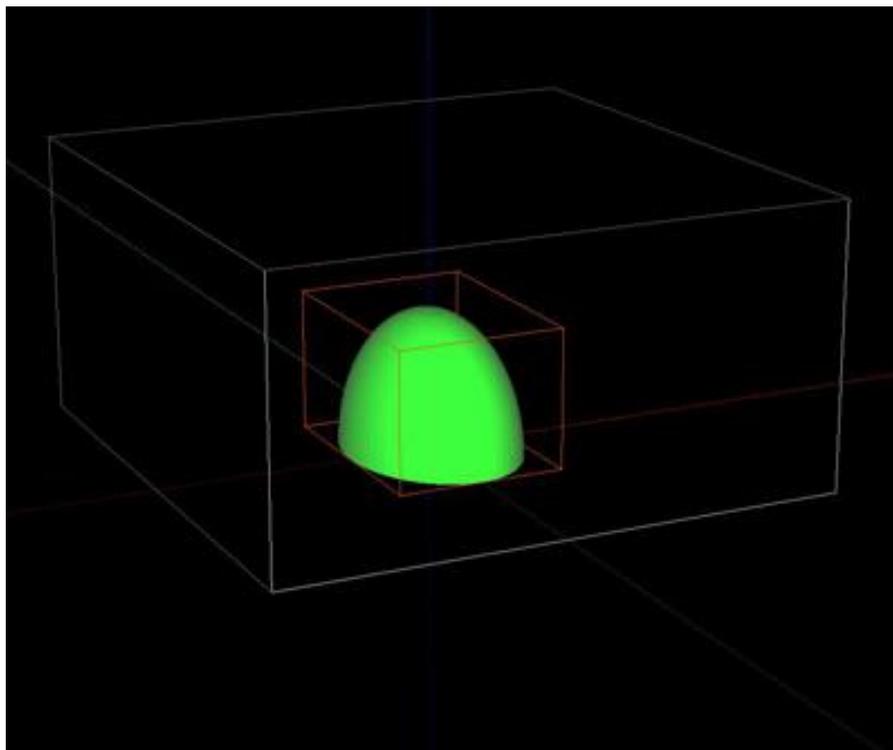


Рисунок 3.24. Пример объекта типа «Полуэллипсоид» на сцене

- Эллипсоид. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Эллипсоид», имеет вид, представленный на рисунке 3.25.



Рисунок 3.25. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Эллипсоид»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: горизонтальные полуоси эллипсоида («Радиус 1», «Радиус 2») и удвоенная третья полуось («Высота»).

Пусть полуоси эллипсоида равны 50, 30 и 30. Тогда Радиус1=50, Радиус2=30, Высота=60. Вид такого эллипсоида на сцене представлен на рисунке 3.26.

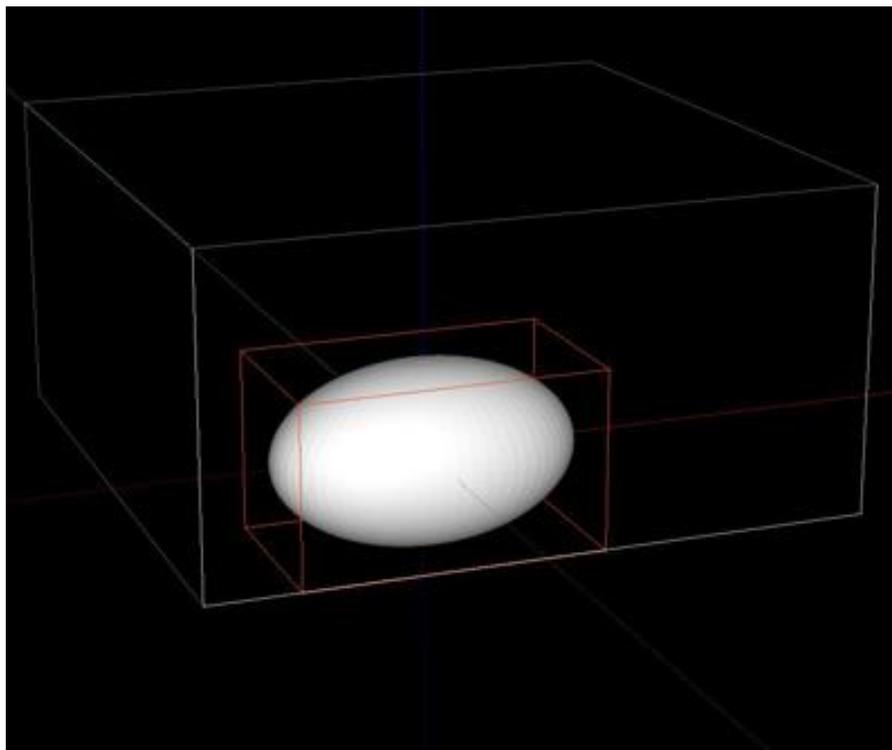


Рисунок 3.26. Пример объекта типа «Эллипсоид» на сцене

- Г-здание. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Г-здание» (Г-образное здание) имеет вид, представленный на рисунке 3.27.

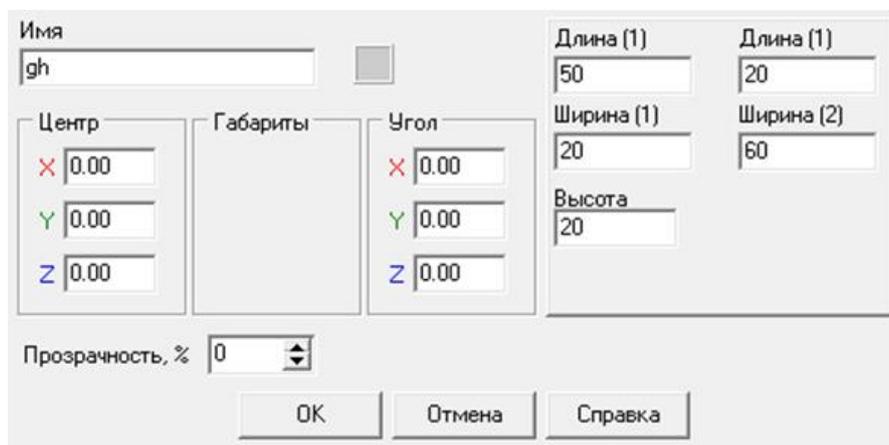


Рисунок 3.27. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Г-здание»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: «Длина 1», «Длина 2», «Ширина 1», «Ширина 2», «Высота». На рисунке 3.28 представлен вид сверху (ортогональная проекция) на Г-здание с сопоставлением реальных геометрических характеристик данного типа объекта и их названий.

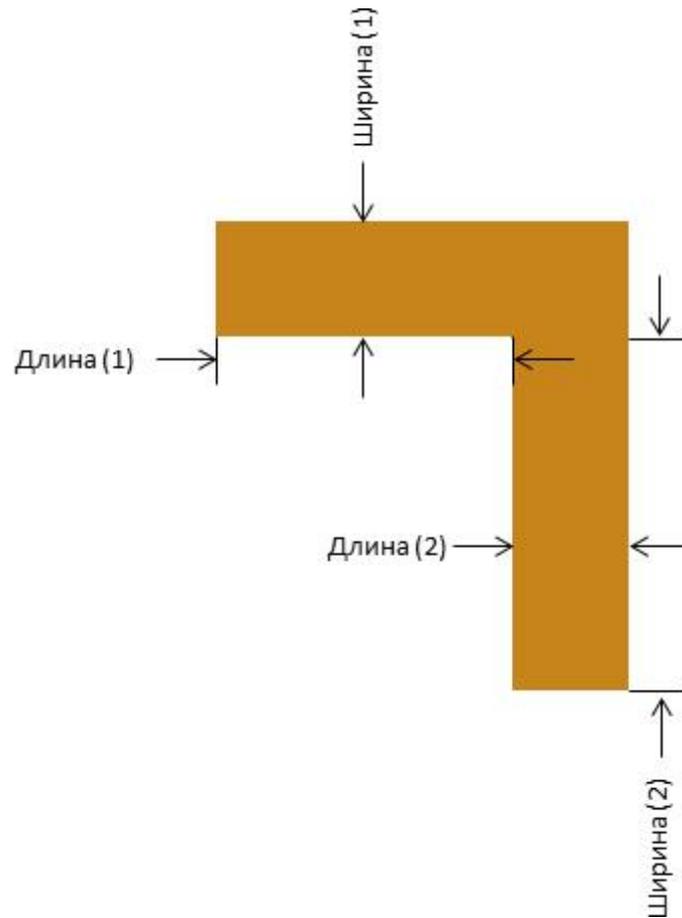


Рисунок 3.28. Схема объекта типа «Г-здание». Вид сверху

Г-здание можно рассматривать как прямую призму, основание которой — это геометрическая фигура, представленная на предыдущем рисунке; при этом параметр Высота соответствует высоте призмы.

Пусть заданы следующие параметры Г-здания (м):

- Длина (1) = 50;
- Длина (2) = 20;
- Ширина (1) = 20;
- Ширина (2) = 60;
- Высота = 20.

Вид этой фигуры на сцене представлен на рисунке 3.29.

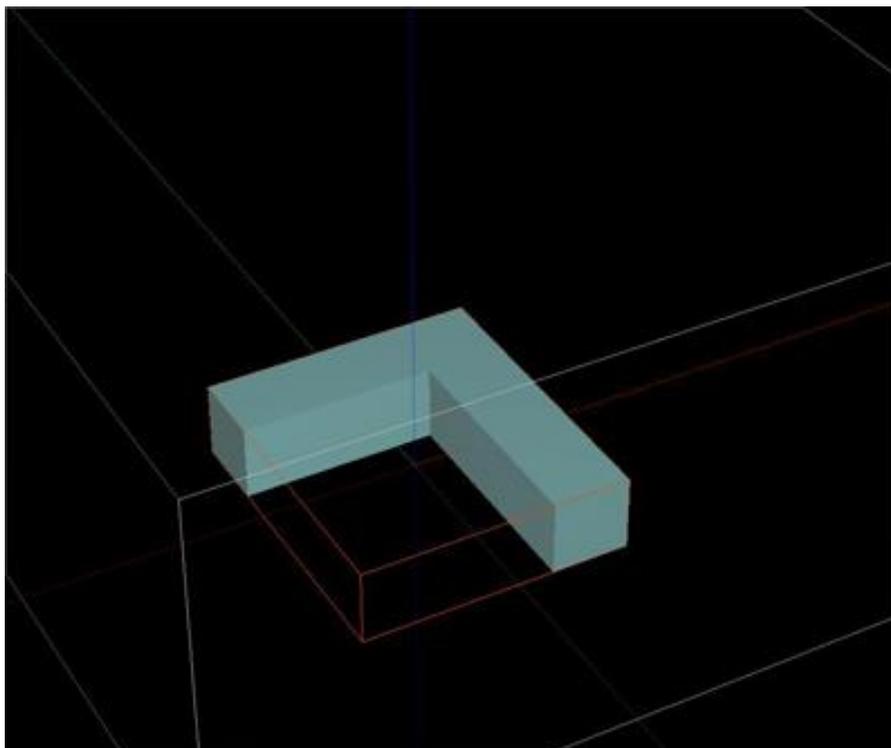


Рисунок 3.29. Пример объекта типа «Г-здание» на сцене

- П-здание. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «П-здание» (П-образное здание) имеет вид, представленный на рисунке 3.30.

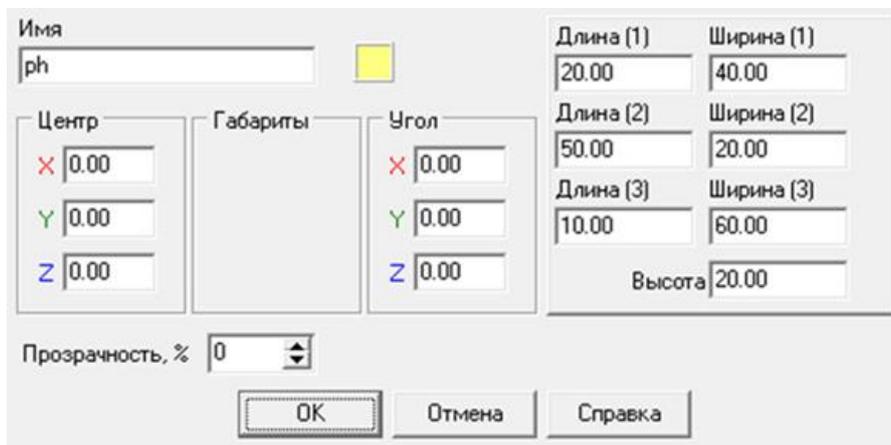


Рисунок 3.30. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «П-здание»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: «Длина(1)», «Длина (2)», «Длина (3)», «Ширина (1)», «Ширина (2)», «Ширина (3)», «Высота». На рисунке 3.31 представлен вид сверху (ортогональная проекция) на «П-здание» с сопоставлением реальных геометрических характеристик данного типа объекта и их названий.

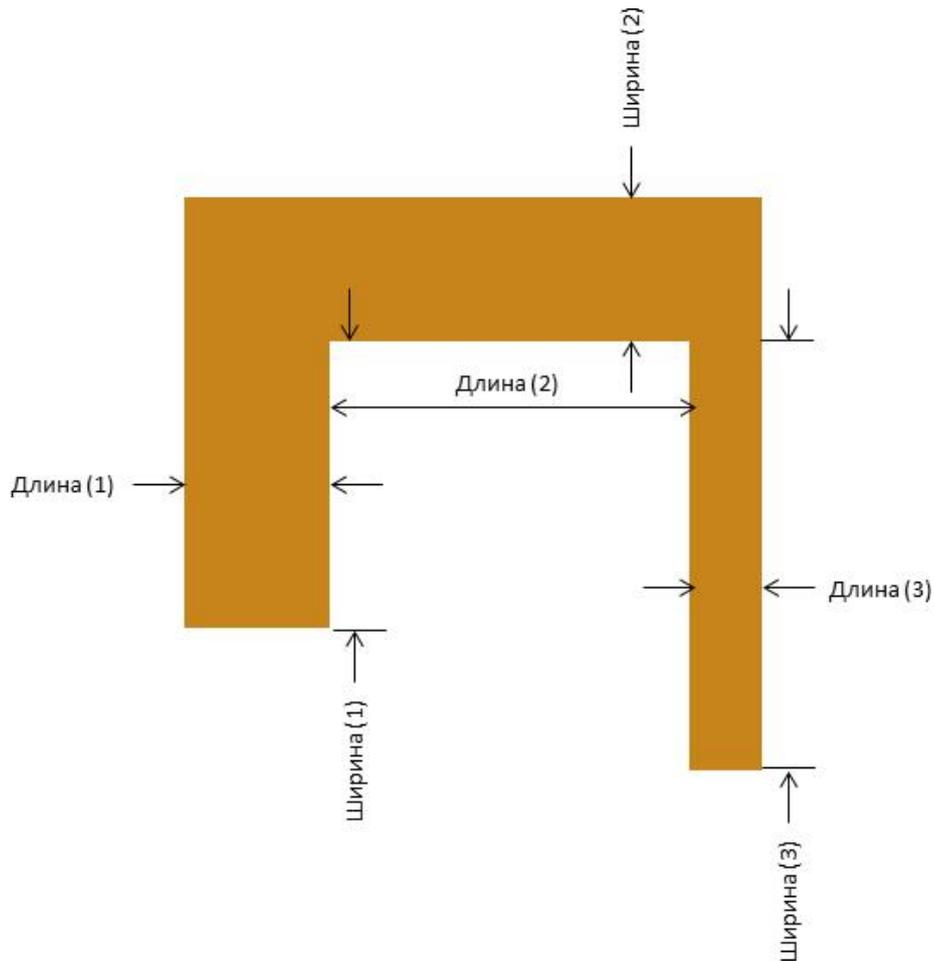


Рисунок 3.31. Схема объекта типа «П-здание». Вид сверху

«П-здание» можно рассматривать как прямую призму, основание которой — это геометрическая фигура, представленная на предыдущем рисунке; при этом параметр «Высота» соответствует высоте призмы.

Пусть заданы следующие параметры П-здания:

- Длина (1) = 20;
- Длина (2) = 50;
- Длина (3) = 10;
- Ширина (1) = 40;
- Ширина (2) = 20;
- Ширина (3) = 60;
- Высота = 20.

Вид этой фигуры на сцене представлен на рисунке 3.32.

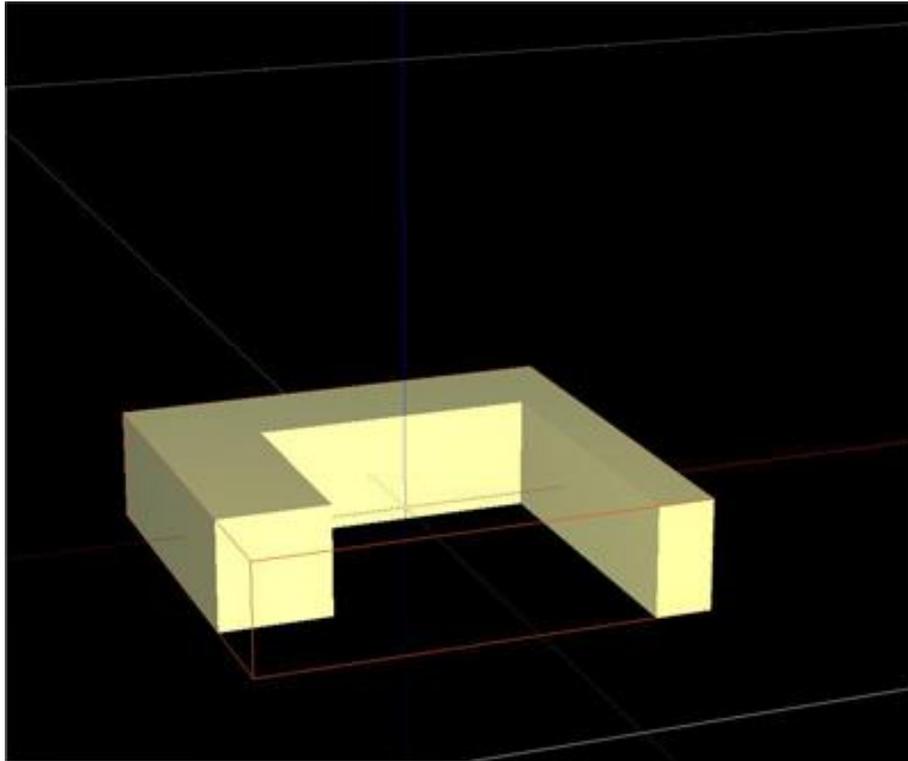


Рисунок 3.32. Пример объекта типа «П-здание» на сцене

- Градирня. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Градирня», имеет вид, представленный на рисунке 3.33.

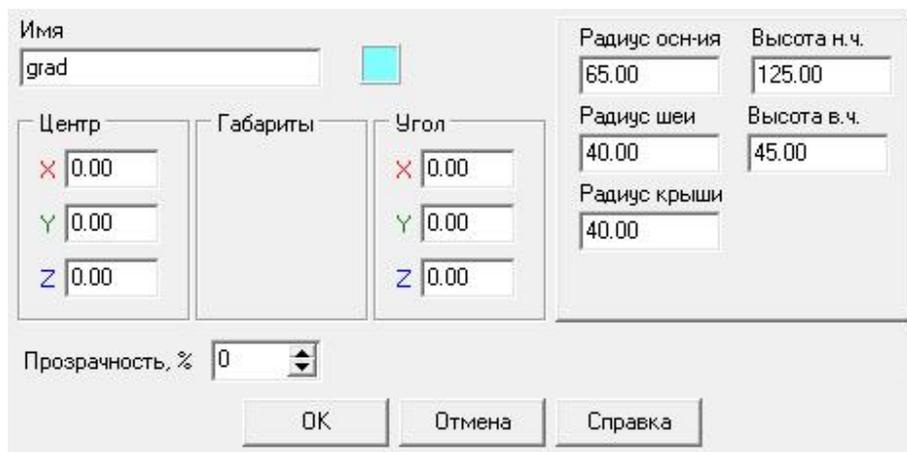


Рисунок 3.33. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Градирня»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: «Радиус основания», «Радиус «шеи», «Радиус крыши», «Высота нижней части», «Высота верхней части». На рисунке 3.34 представлен вид сбоку (ортогональная проекция) на градирню с размерами объекта и их названиями.

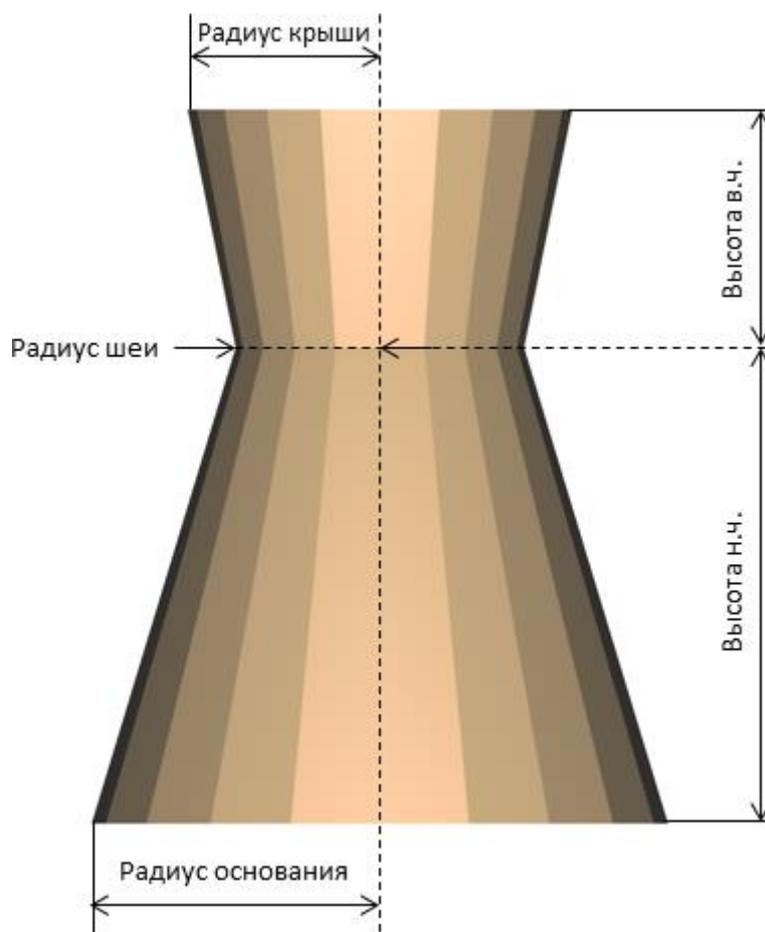


Рисунок 3.34. Схема объекта типа «Градирня». Вид сбоку, в. ч. — верхняя часть, н. ч. — нижняя часть

Мы аппроксимируем такой сложный объект, как «Градирня», двумя смыкающимися усеченными конусами. Радиусы этих конусов в месте соединения равны, поэтому для однозначного определения градирни в горизонтальном измерении достаточно знать радиусы оснований этих конусов («Радиус основания» и «Радиус крыши»), а также радиус верхней части каждого конуса («Радиус «шеи»»).

В вертикальном направлении необходимо задать высоты этих конусов («Высота нижней части» и «Высота верхней части»).

- Призма. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Призма» имеет вид, представленный на рисунке 3.35.

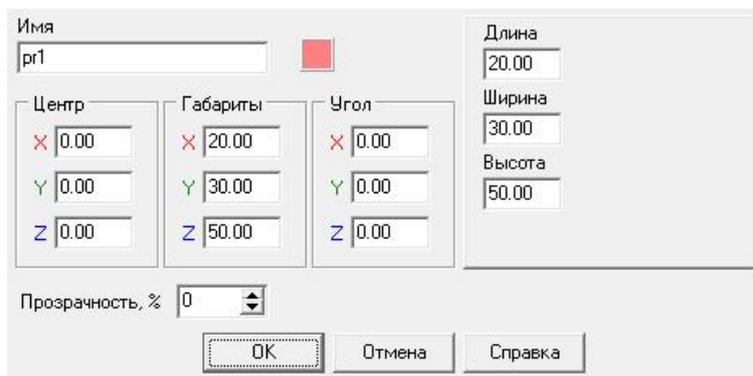


Рисунок 3.35. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Призма»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: «Длина», «Ширина» и «Высота». Основанием прямоугольной призмы является равнобедренный треугольник: «Длина» — это основание; «Ширина» — высота этого треугольника. «Высота» — является вертикальным размером «Призмы». При таком определении призмы «Длина», «Ширина» и «Высота» являются размерами габаритного прямоугольного параллелепипеда для этой фигуры.

Вид «Призма» с размерами 20x30x50 на сцене представлен на рисунке 3.36.

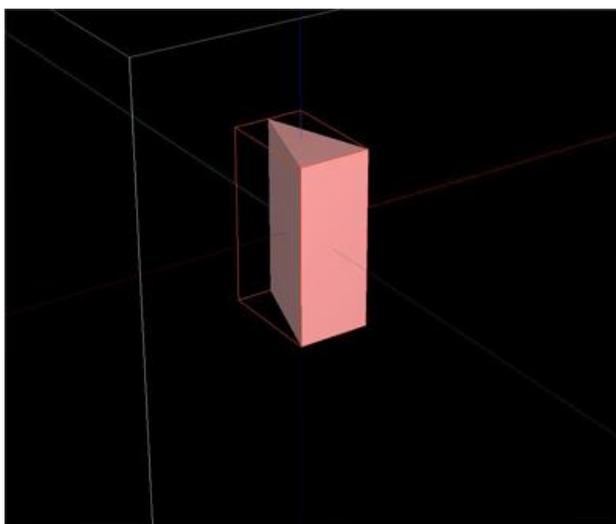


Рисунок 3.36. Пример объекта типа «Призма» на сцене

- Призма 2. Диалог, появляющийся при создании/редактировании объекта типа «Призма 2» имеет вид, представленный на рисунке 3.37.

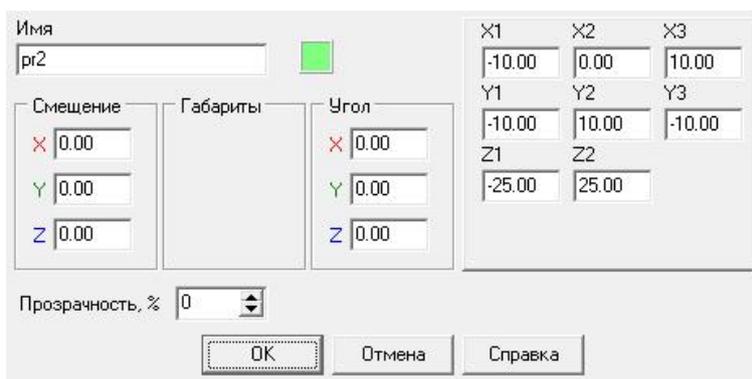


Рисунок 3.37. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Призма 2»

В правой верхней части диалога содержится информация о самом объекте: «X1», «X2», «X3», «Y1», «Y2», «Y3», «Z1», «Z2». Основанием прямоугольной призмы является произвольный треугольник, заданный в плоскости XY по 3 точкам: (X1, Y1), (X2, Y2), (X3, Y3). Параметры «Z1» и «Z2» определяют вертикальные границы Призмы 2 и (следовательно, ее высоты, равную Z2—Z1). Рассмотрим призму со следующими геометрическими характеристиками:

- X1 = -10;
- X2 = 0;
- X3 = 10;

- $Y1 = -10$;
- $Y2 = 10$;
- $Y3 = 10$;
- $Z1 = -25$;
- $Z2 = 25$.

Вид такой призмы на сцене представлен на рисунке 3.38.

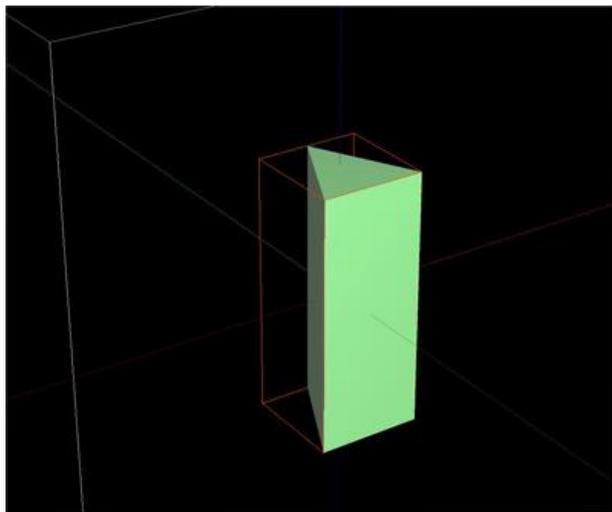


Рисунок 3.38. Пример объекта типа «Призма 2» на сцене

- Произвольный трехмерный объект. При загрузке объекта произвольной геометрии из STL-файла, пользователю сначала предлагается выбрать этот файл с помощью стандартного диалога выбора файла. После нажатия на кнопку «Открыть» объект будет загружен. После загрузки появится диалог, представленный на рисунке 3.39.

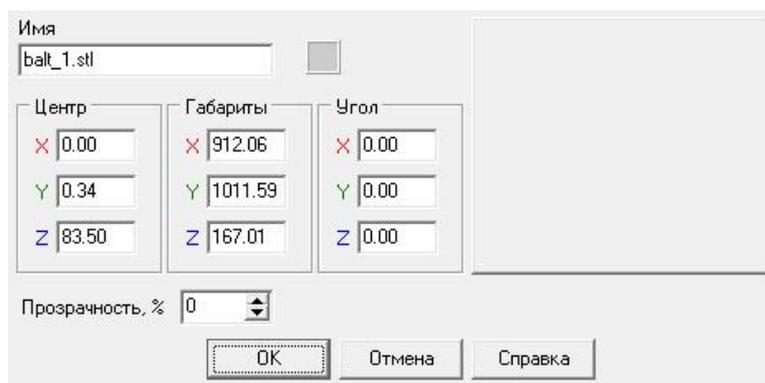


Рисунок 3.39. Диалог «STL объект» в режиме создания/редактирования объекта типа «Произвольный трехмерный объект»

Среди свойств произвольного объекта можно выделить лишь вектор смещения и углы поворота вокруг координатных осей. Габариты произвольного объекта определяются содержимым файла, из которого он был загружен. После нажатия на кнопку «ОК» пользователю будет предложено установить расчетную область исходя из габаритов свободного объекта.

На рисунке 3.40 в качестве примера произвольного объекта представлена промышленная площадка проекта АЭС-2006.

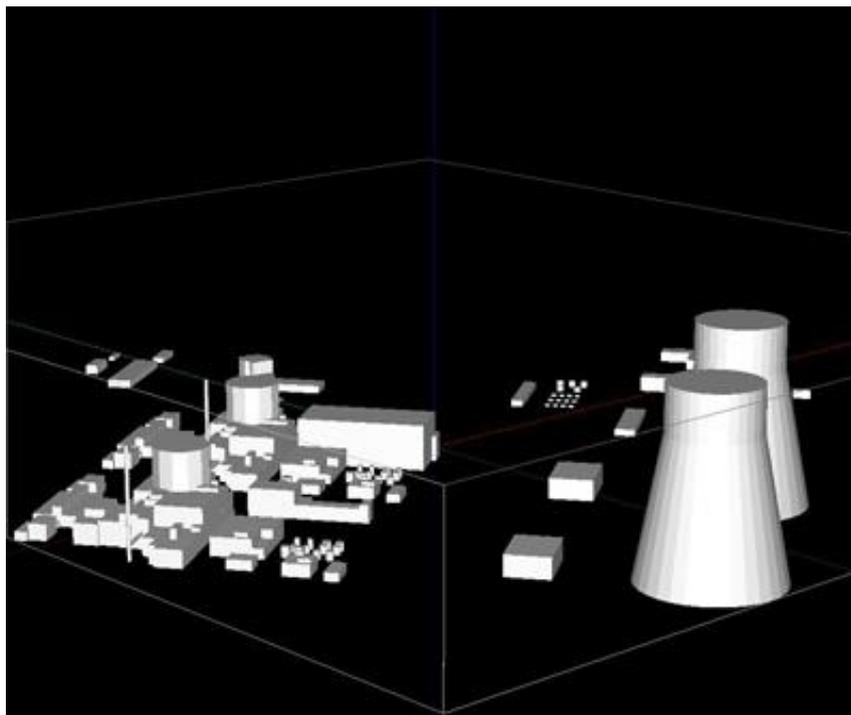


Рисунок 3.40. Пример объекта типа «Произвольный трехмерный объект» на сцене — промышленная площадка проекта АЭС-2006

Строка состояния

Строка состояния расположена в нижней части главного окна и предназначена для:

- отображения размеров панели образа (например, 285×203 пикселей);
- отображения координат «мыши» при отображении в ортогональной проекции;
- отображения названия выбранного объекта, его положения в пространстве и углов наклона относительно родительского элемента (то есть прямоугольного параллелепипеда, ограничивающего расчетную область).

Настройки

Диалоговое окно «Настройки» имеет вид, представленный на рисунке 3.41.

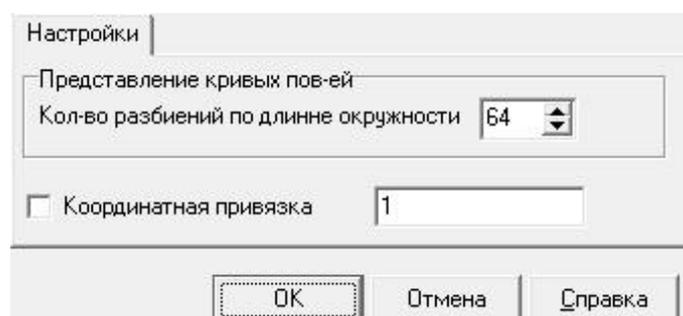


Рисунок 3.41. Диалоговое окно «Настройки»

Количество разбиений по длине окружности — это разрешение разбиения развернутого угла на сегменты при аппроксимации поверхностей типа эллипсоид и цилиндр. Флажок «Координатная привязка» включает привязку центров объектов к координатной сетке, шаг которой задается в поле справа.

Операции с объектами

Диалог «Операции с объектами» появляется при выполнении команды главного меню «Объект/Операция» и позволяет создавать новый объект на основе двух существующих объектов. На рисунке 3.42 представлен вид этого окна.

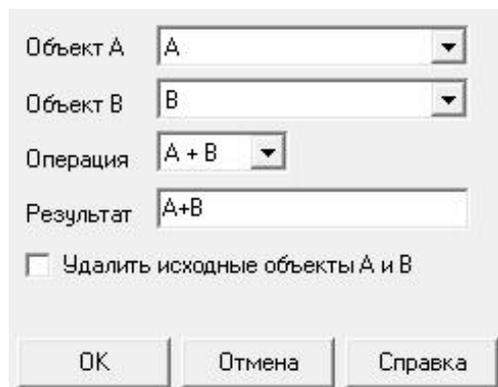


Рисунок 3.42. Диалоговое окно «Операции с объектами»

В выпадающем списке «Объект А» выбирается первый объект. В выпадающем списке «Объект В» выбирается второй объект. Поле «Операция» задает геометрическую операцию с выбранными объектами:

- $A + B$ — объединение объектов (те и только те точки, которые находятся внутри хотя бы одного из объектов, будут находиться внутри результирующего объекта);
- $A - B$ — вычитание объектов (те и только те точки, которые находятся внутри объекта А и вне объекта В, будут находиться внутри результирующего объекта);
- $A \& B$ — пересечение объектов (те и только те точки, которые находятся внутри обоих объектов, будут находиться внутри результирующего объекта);

В поле «Результат» задается имя результирующего объекта. Изначально оно формируется на основе имен исходных объектов и типа операции, но его можно дополнительно отредактировать. Проставленный флажок «Удалить исходные объекты А и В» обеспечивает удаление объектов А и В из сцены после создания в ней результирующего объекта.

Во время операции появляется индикатор прогресса и кнопка «Стоп». По кнопке «Стоп» можно остановить операцию.

В процедуре построения нового объекта, на основе двух входных объектов, осуществляется перебор граней (треугольников) объектов и их разбиение на новые треугольники. Два треугольника могут пересекаться в одной точке, по отрезку или по многоугольнику. При этом область пересечения порождает новые вершины, которые образуют несколько новых треугольников.

Полное количество разбиений (треугольников, которые пересекаются) определяется непосредственным перебором. Это количество не может быть больше суммарного количества треугольников, которые составляют объекты по отдельности. 100% отметка для индикатора прогресса соответствует этому максимально возможному количеству треугольников. Операция выполнится, когда будут обработаны все грани (треугольники) как первого, так и второго объекта; при обработке очередной грани индикатор прогрессирует, причем скорость движения индикатора может быть непостоянной.

Рассмотрим пример использования операций применительно к 2 объектам:

- объект А — «П-здание»;
- объект В — «Параллелепипед».

На рисунке 3.43 изображен вид этих объектов на сцене.

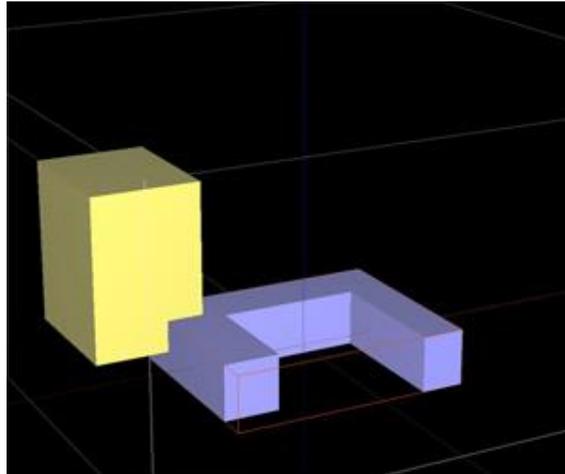


Рисунок 3.43. Объекты A и B (объект A обрамлен красным габаритным параллелепипедом)

На рисунке 3.44 изображены виды объекта A+B с разных ракурсов. На рисунке 3.45 — объект A – B. На рисунке 3.46 — объект A & B.

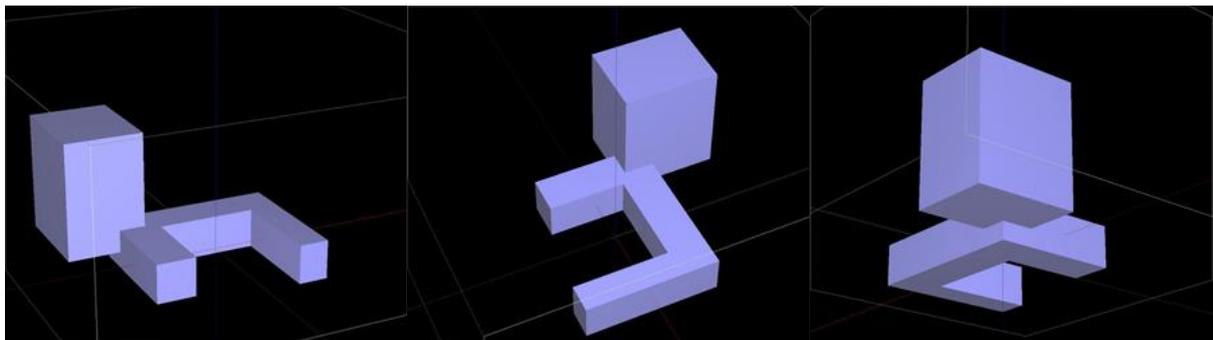


Рисунок 3.44. Объект A + B (с разных ракурсов)

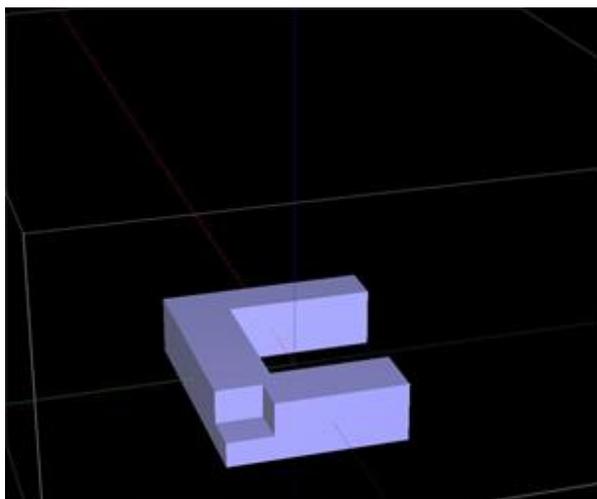


Рисунок 3.45. Объект A – B

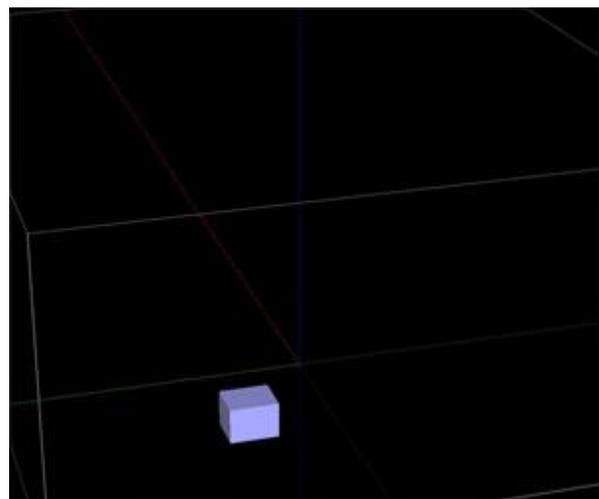


Рисунок 3.46. Объект A & B

3.5.4. Сетка и карта

Диалог «Сетка и карта» показан на рисунке 3.47.

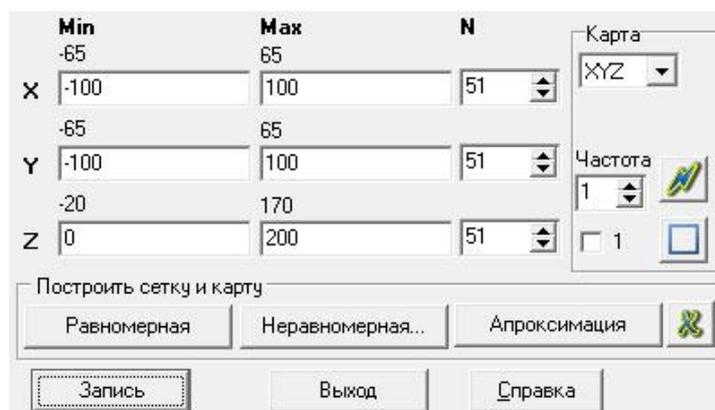


Рисунок 3.47. Диалог «Сетка и карта»

Диалог содержит параметры расчетной области. Основное назначение данного диалога — это создание расчетной сетки и карты на ее основе. В этом диалоге по каждому направлению (X, Y, Z) задается следующая информация (слева направо): координата первой ячейки, координата последней ячейки, количество ячеек вдоль этого направления. Над полями ввода первой и последней ячеек выводятся соответствующие координаты границ габаритного каркаса сцены (совокупного объекта, состоящего из всех отдельных объектов сцены).

Равномерная сетка

Группа «Построить сетку и карту» содержит три кнопки. Кнопка «Равномерная» запускает процесс построения равномерной сетки и карты области.

На трехмерной сцене построенная карта отображается в виде набора белых точек, находящихся в узлах сетки, попавших внутрь объектов. На рисунках 3.48, 3.49 отображена сцена и карта, построенная на основе типового трехмерного объекта.

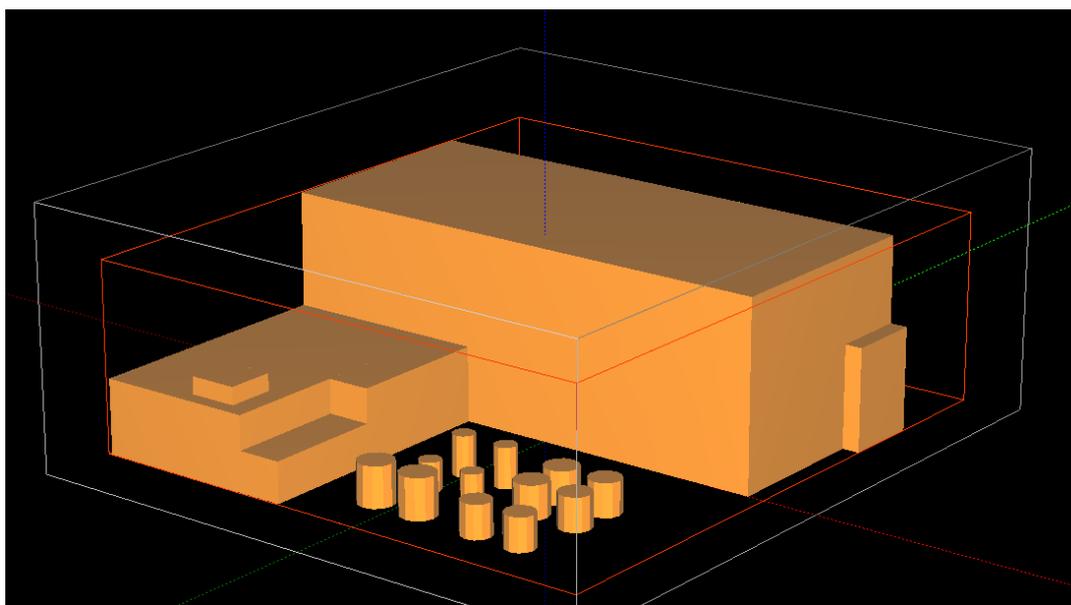


Рисунок 3.48. Сцена с типовым трехмерным объектом

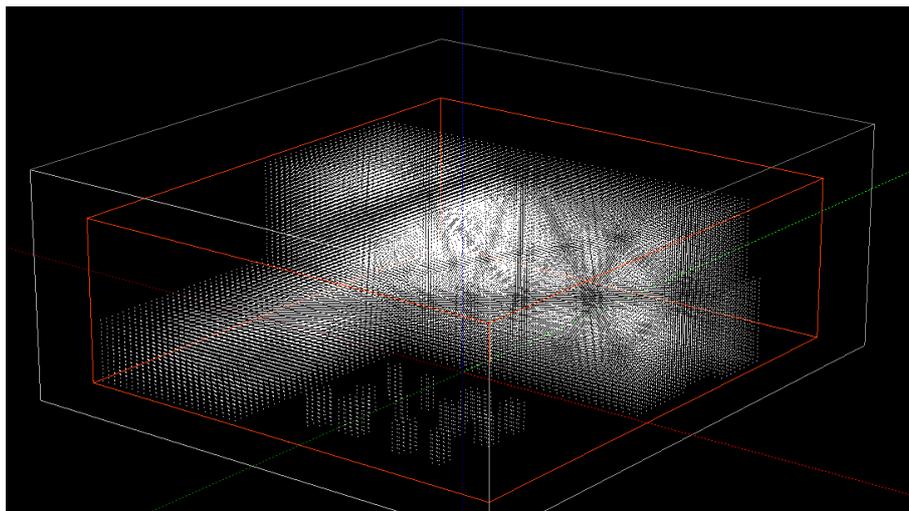


Рисунок 3.49. Сцена с картой фиктивных областей, построенной на основе типового трехмерного объекта

Кнопка «Неравномерная» вызывает диалог редактирования неравномерной сетки. Кнопка «Аппроксимация» вызывает процедуру построения аппроксимационного объекта-сетки. Данная процедура создает карту объектов, если есть расчетные ячейки, включающие в себя как объект, так и свободную от объекта среду — воздух. После этого происходит конвертация карты в формат STL. В результате этой операции создается новый объект с именем «Аррох».

Пусть, например, на сцене присутствует прямоугольный параллелепипед с размерами $30 \times 40 \times 50$ и повернутый вокруг своих осей (X, Y, Z) последовательно на углы 20, 30, 40 градусов соответственно. Параллелепипед представлен на рисунке 3.50.

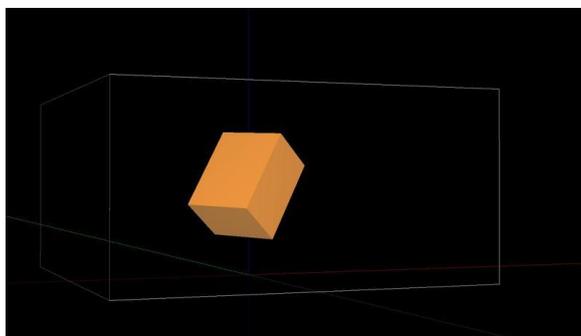


Рисунок 3.50. Повернутый вокруг своих осей параллелепипед на сцене

Пусть расчетная сетка имеет шаг 2 по всем направлениям, тогда аппроксимационный объект будет иметь вид, представленный на рисунке 3.51.

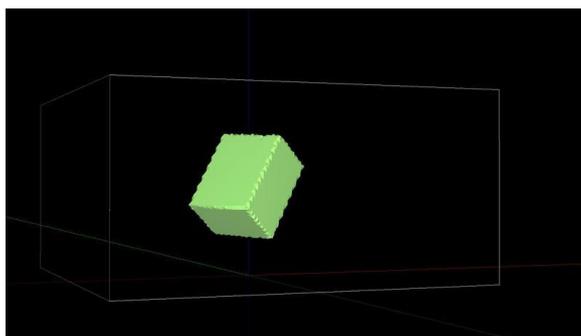


Рисунок 3.51. Аппроксимационный объект на сцене

При построении карты все видимые объекты сцены перебираются последовательно по списку.

Группа «Карта» предназначена для визуализации карты в виде набора точек (узлов расчетной сетки). В выпадающем списке выбирается тип визуализации: трехмерный образ XYZ или по сечениям X (в плоскости YZ), Y (в плоскости XZ) или Z (в плоскости XY). При выборе по сечению в поле ниже вводится индекс координаты соответствующего направления. В качестве примера рассмотрим сечение XZ при значении Y=49 в рассмотренной геометрии, представленное на рисунке 3.52.

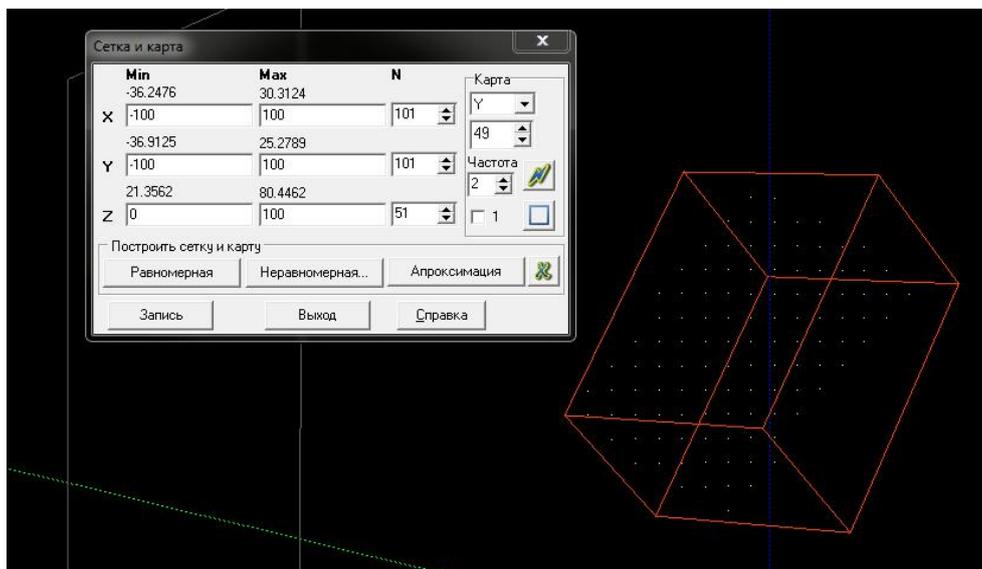


Рисунок 3.52. Визуализация карты в плоском сечении на сцене

В поле «Частота» устанавливается целочисленный коэффициент разрежения для визуализации карты. Кнопка изменяет на трехмерном образе точки карты в соответствии с заданным коэффициентом разрежения. Активация/Отключение окна рядом с цифрой 1 включает/выключает показ воздушных расчетных узлов карты. Кнопка включает/выключает видимость белого каркаса расчетной области.

В используемой библиотеке трехмерной графики неявно присутствует ограничение на полное количество точек, которые могут быть показаны одновременно в трехмерном пространстве. По этой причине в программе введено ограничение на максимальное число визуализируемых точек карты, равное миллиону. То есть, наилучшая сетка, на которой могут быть показаны все точки карты, имеет разрешение $100 \times 100 \times 100$. При использовании более подробной сетки в поле «Частота» необходимо увеличить коэффициент (до 2 или более).

Кнопка «Запись» сохраняет в папке модели все необходимые данные для визуализатора и для сценариев расчета по данной геометрии. Кнопка «Выход» закрывает *GeometryEditor*. Кнопка «Справка» вызывает справку. Кнопка удаляет построенную карту.

По умолчанию при создании новой геометрии строится равномерная сетка и производится маркировка точек равномерной сетки. Если необходимо сделать неравномерную сетку, сгущая или прореживая узлы в некоторых местах вдоль осей, то нужно вызвать диалог редактирования неравномерной сетки. При этом после построения неравномерной сетки будет запущена процедура маркировки узлов этой сетки. Если же снова нажать кнопку «Равномерная», то будет построена равномерная сетка в соответствии с текущими параметрами.

Неравномерная сетка

Пусть в расчетной области находится полусфера. Тогда окно построения неравномерной сетки будет иметь вид, представленный на рисунках 3.53, 3.54.

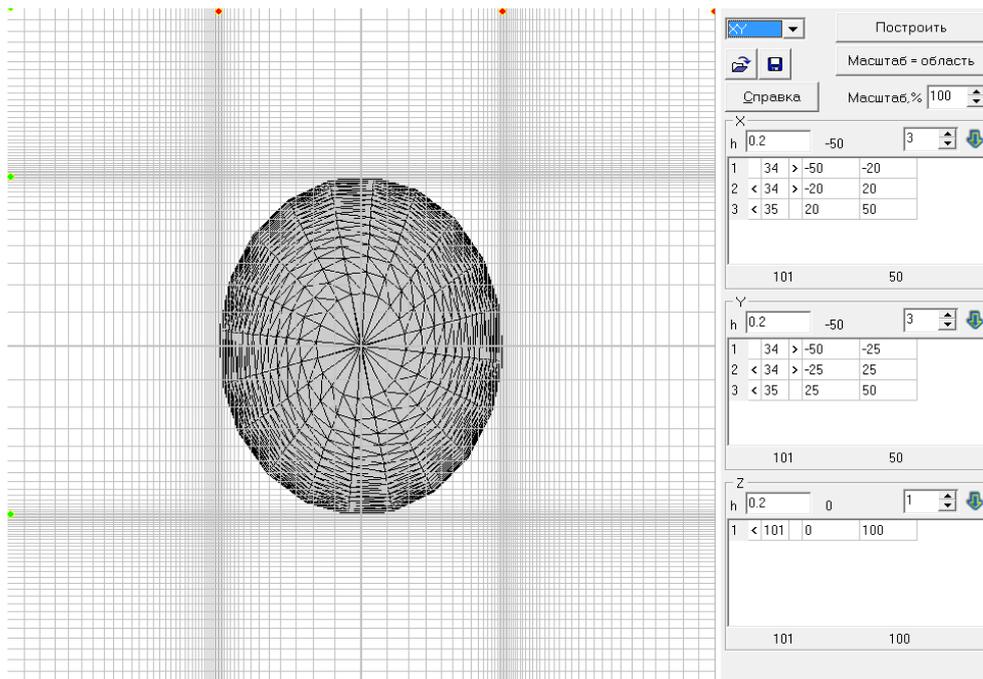


Рисунок 3.53. Задание параметров неравномерной сетки. Проекция расчетной сетки в плоскости XY

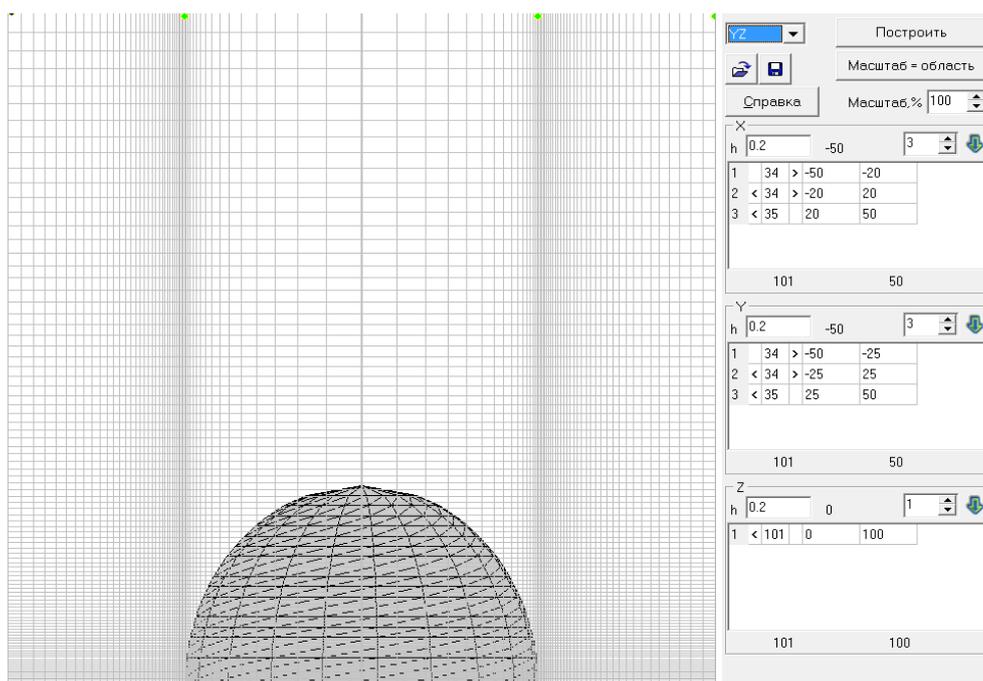


Рисунок 3.54. Задание параметров неоднородной сетки. Проекция расчетной сетки в плоскости YZ

В заголовке окна выдаются текущие координаты курсора «мышь». В центральной части окна находится ортогональная проекция с построенной сеткой. Изображение проекции можно:

- двигать «мышкой» с нажатой клавишей «Ctrl»;
- масштабировать при помощи поля «Масштаб, %».

Выпадающий список задает вид проекции: XY, XZ или YZ. При нажатии на кнопку «Построить» окно закрывается, и если были проделаны изменения, то запускается процесс маркировки карты для построенной неравномерной сетки. Кнопка «Масштаб = область» приводит масштаб к 100% и центрирует проекцию (если она была сдвинута). Поле «Масштаб,

«%» задает коэффициент масштабирования. Кнопка  загружает параметры сетки из файла *.mpar. Кнопка  сохраняет параметры сетки в файл *.mpar.

Для каждой координатной оси (X, Y или Z) задается параметр h — минимальный размер ячейки для алгоритма сгущения сетки, строится таблица сегментов с контрольными точками, последовательность которых разбивает область по данному измерению на отдельные сегменты, в каждом из которых сетка может быть равномерной или сгущающейся к одному из двух, либо к обоим концам сегмента. Сегментов в таблице может быть не более 50 по каждому направлению.

Каждая строка таблицы содержит следующие поля (столбцы):

- порядковый номер сегмента;
- признак сгущения сетки влево (пробел, либо знак <);
- количество узлов в данном сегменте;
- признак сгущения сетки вправо (пробел либо знак >);
- левая координата сегмента;
- правая координата сегмента.

Левая координата сегмента является правой координатой предыдущего сегмента. Над столбцом координат таблицы показана крайняя левая точка области, которая является левой координатой первой области. Под столбцом координат таблицы показана крайняя правая точка области (в качестве ориентира при редактировании). Последовательность точек сегментов должна быть возрастающей. Если это не так, то крайняя правая точка области под столбцом координат подсвечивается красным цветом.

Под столбцом таблицы с количеством узлов показана сумма всех узлов по всем сегментам (в качестве контроля правильности задания параметров в процессе редактирования). Следует учитывать, что общие точки смежных сегментов являются одним и тем же узлом сетки. Общее количество узлов по всем сегментам должно равняться числу узлов равномерной сетки. Если это не так, то текущее общее количество узлов подсвечивается красным цветом.

Точки, разбивающие сетку по измерению на сегменты, рисуются на левой и верхней стороне проекции. Цвет точки обозначает ось: X — красный, Y — зеленый, Z — синий. Эти точки можно выбирать и двигать «мышью».

В правом верхнем углу группы полей каждого измерения находится целочисленное поле и кнопка . С помощью этого поля задается количество сегментов, на которое необходимо разбить область по данному направлению; по нажатию кнопки производится разбивка по умолчанию.

При редактировании неравномерной сетки имеется возможность откатывать назад правки. Правки всех числовых параметров, определяющих сетку, запоминаются в истории изменений. Переключение видов проекций и изменение масштаба рисунка не попадают в историю изменений.

История изменений параметров неравномерной сетки хранится для текущего сеанса работы с данным окном (с момента открытия). Доступны следующие команды:

- Ctrl+Z — отменить последнюю операцию редактирования сетки;
- Ctrl+Y — повторить последнюю отмененную операцию редактирования сетки (отменить последнюю отмену).

Клавиши быстрого доступа

GeometryEditor поддерживает следующие клавиши быстрого доступа:

- Ctrl+O — «Файл → Открыть»;

- Ctrl+S — «Файл → Сохранить»;
- Ctrl+Z — «Правка → Отменить»;
- Ctrl+Y — «Правка → Повторить» (сделать снова отмененное действие);
- Ctrl+Del — «Объект → Удалить»;
- Ctrl+Enter — «Объект → Редактировать»;
- Space — «Объект → Показать/спрятать»;
- F8 — «Объект → Операция»;
- Ctrl+левая кнопка «мыши» — «Выбор объекта на сцене»;
- Ctrl+Shift+левая кнопка «мыши» — «Приближение/удаление камеры»;
- Shift+левая кнопка «мыши» — «Поворот камеры»;
- Левая кнопка «мыши» — «Перемещение/поворот объекта/сцены» (в зависимости от выбора режима на панели управления).

Конфигурационный файл

GeometryEditor содержит конфигурационный файл «GeometryEditor.ini», где хранятся текущие установки параметров:

- Секция [FileName]: FileName — имя последнего открытого файла;
- Секция [Window]: WndPlacement — расположение и размеры главного окна программы; Splitter — ширина в пикселях окна Дерева объектов; HistoryDepth — глубина истории (максимальное количество состояний сцены, которые сохраняются в оперативной памяти после каждого действия пользователя по отношению к содержимому сцены для последующего возможного восстановления);
- Секция [Mesh]: WindowX — левая координата окна сетки и карты; WindowY — верхняя координата окна сетки и карты; Nx — количество узлов по X; Ny — количество узлов по Y; Nz — количество узлов по Z; Map2D_WndPlacement — расположение и размеры окна диалога неравномерной сетки; Draw1 — рисовать (1) или нет (0) точки карты первой области. При значении 1 будут показаны все узлы расчетной сетки независимо от того, являются ли они фиктивными или воздушными; MapDensity — коэффициент разрежения узлов карты для показа (целое число);
- Секция [Spiral]: NL — разрешение разбиения развернутого угла на сегменты при аппроксимации поверхностей типа эллипсоид и цилиндр;
- Секция [Preferences]: FlagSnap — задана (1) или нет (0) координатная привязка; SnapStep — шаг координатной привязки;
- Секция [RecentFiles]: Count — количество последних открытых файлов.

3.6. Редактор сценариев

EditInp — программа для редактирования сценария выброса для задачи расчета гидротермодинамики и переноса радиоактивного загрязнения в условиях произвольной трехмерной геометрии с использованием декартовой прямоугольной расчетной сетки. Программа позволяет просматривать и изменять ранее созданные сценарии. Сценарий представляет собой данные, характеризующие условия распространения радиоактивной примеси в расчетной области модели, для которой он сформирован. Основное окно программы *EditInp* приведено на рисунке 3.55.

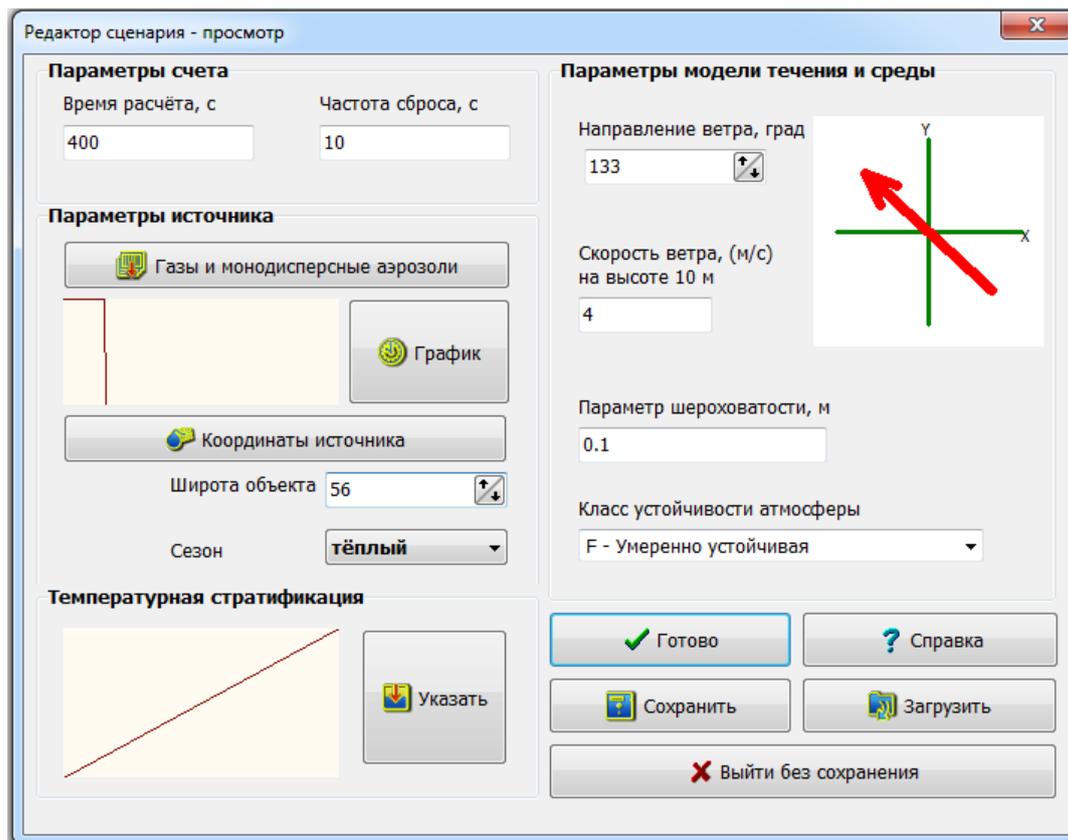


Рисунок 3.55. Основное окно EditInp

Вводимые пользователем параметры:

- время расчета, с — модельное время прогноза распространения радиоактивной примеси;
- частота сброса, с — интервал модельного времени, через который будет производиться сброс промежуточных результатов моделирования (поля концентраций, осадений) в виде специальных файлов для постпроцессинга (программы *Simulator*);
- направление ветра, град — направление скорости ветра на входных вертикальных границах (входные границы также определяются направлением ветра; граница считается входной, если в нее втекает ветровой поток). Направление 270° соответствует направлению вдоль оси X. Справа от поля ввода находится холст с наглядным изображением направления ветра в виде развернутого на соответствующий угол вектора;
- скорость ветра — величина горизонтальной скорости ветра на высоте 10м над подстилающей поверхностью на входных вертикальных границах, м/с;
- параметр шероховатости — шероховатость твердых поверхностей земли и зданий;
- класс устойчивости атмосферы — класс устойчивости атмосферы из заданного списка, который появляется при нажатии на стрелку справа от соответствующего поля;
- широта, на которой расположен объект;
- сезон (холодный, теплый).

При задании класса устойчивости автоматически задается вертикальный профиль температуры (который имеет линейный вид). Следует отметить, что направление ветра, скорость ветра на 10м, шероховатость поверхностей, и класс устойчивости атмосферы определяют вертикальный профиль горизонтальной скорости ветра на входных границах в соответствии с моделью Пограничного Слоя Атмосферы (ПСА).

Пользователь может использовать дополнительные подменю при нажатии на соответствующие кнопки:

- «Газы и монодисперсные аэрозоли» — открывает окно редактирования радионуклидного состава источника. Окно представлено на рисунке 3.56.

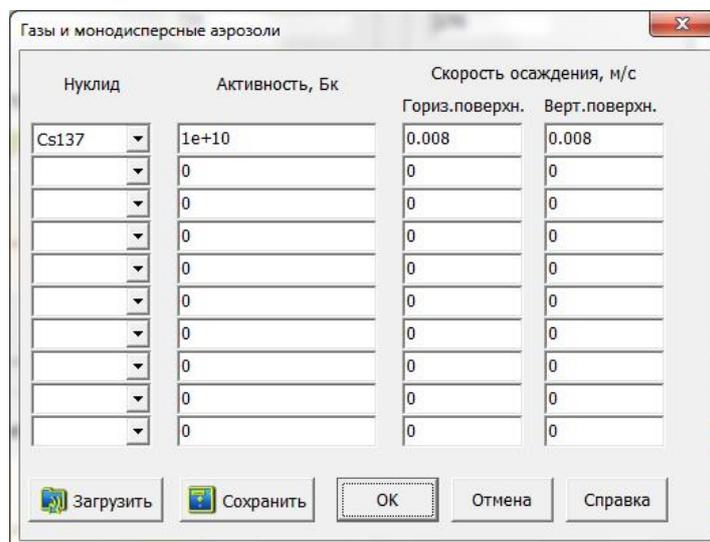


Рисунок 3.56. Окно «Газы и монодисперсные аэрозоли»

В данном окне слева задается список радионуклидов из базы данных (база данных находится в папке nuclid_database\). В следующем столбце задается суммарный выход каждого радионуклида. Два следующих столбца определяют значения скорости осаждения на горизонтальные и вертикальные твердые поверхности.

Кроме того, данное окно позволяет выполнить следующие действия:

- кнопка «Загрузить» позволяет считать список радионуклидов из файла с расширением *.dpar;
- кнопка «Сохранить» позволяет сохранить текущий список в файл с расширением *.dpar (для последующей загрузки, например, в другом сценарии);
- кнопка «ОК» сохраняет текущий список в сценарии;
- кнопка «Отмена» закрывает данное окно без сохранения результатов модификации списка радионуклидов.
- «График» — открывает окно редактирования относительного временного профиля интенсивности выхода радионуклидов. Вид окна показан на рисунке 3.57.

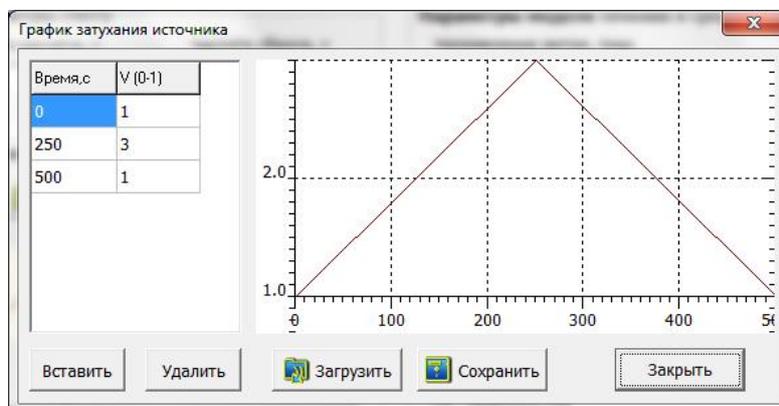


Рисунок 3.57. Окно «График затухания источника»

В левой части окна находится таблица, задающая временной профиль, справа — его график. Окно содержит следующие кнопки:

- «Вставить» — позволяет добавить пару время – значение в таблицу значений;
- «Удалить» — позволяет удалить выделенную пару;
- «Загрузить» — позволяет загрузить профиль из файла *.brag;
- «Сохранить» — позволяет сохранить текущий профиль в файл *.brag (для последующей загрузки, например, в другом сценарии);
- «Закрыть» — закрывает данное окно с сохранением результатов редактирования профиля. Следует отметить, что заданный в данном окне временной профиль относителен и для каждого радионуклида нормируется таким образом, чтобы интеграл по времени от этого профиля был равен суммарному выходу радионуклида;
- «Координаты источника» — открывает окно редактирования положения точки выброса. Вид окна показан на рисунке 3.58.

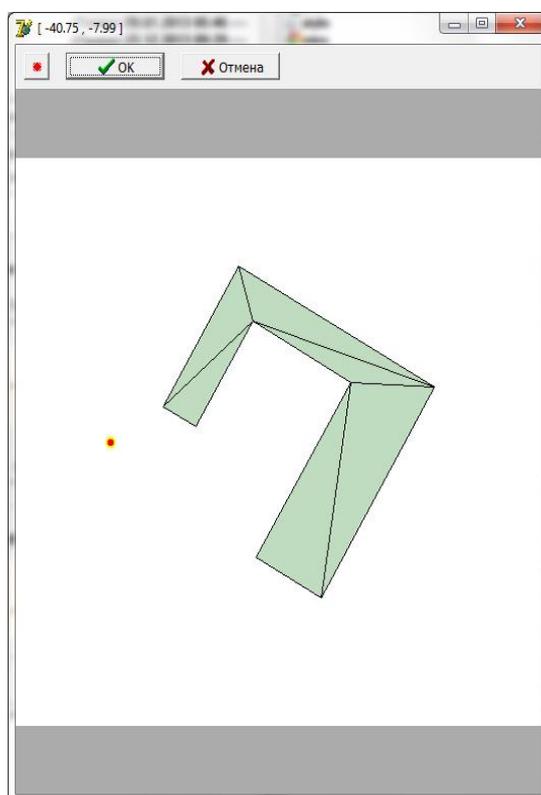


Рисунок 3.58. Окно задания координат источника

В этом окне отображается ортогональная ХУ проекция расчетной области. С помощью курсора «мыши» и нажатой левой клавиши можно задавать горизонтальное положение источника, которое на проекции изображается красным кружочком с желтым обрамлением. Окно содержит следующие кнопки:

- кнопка с красным кружочком, расположенная в верхнем левом углу окна, вызывает окно точного задания координат источника;
- кнопка «ОК» сохраняет результат редактирования положения источника и закрывает окно;
- кнопка «Отмена» закрывает окно без сохранения результатов редактирования;
- Кнопка «Указать» в панели «Температурная стратификация» главного окна программы *EditInp* в левом нижнем углу в данной версии не используется. Ее предназначение — открытие окна редактирования вертикального профиля температуры. В данной версии этот

профиль имеет линейный вид и определяется классом устойчивости атмосферы. Пользователь ограничен в задании вертикального профиля температуры 7 вариантами, каждый из которых соответствует определенному классу устойчивости.

В правом нижнем углу главного окна расположены 5 кнопок:

- «Готово» — завершает работу программы с сохранением всех параметров редактируемого сценария;
- «Сохранить» — позволяет сохранить все параметры сценария в файле специального формата *.spag;
- «Загрузить» — позволяет считать все параметры сценария из файла специального формата *.spag, сохраненного ранее;
- «Справка» — вызов текущей справки;
- «Выйти без сохранения» — завершает работу программы без сохранения параметров, возможно, измененных в текущем сеансе работы с данным сценарием.

3.7. Запуск программы

Для запуска ПС РОУЗ необходимо запустить программу-оболочку *ModelFramework*, исполняемый файл которой (*ModelFramework.exe*) расположен в корневом каталоге с ПС РОУЗ.

Появится окно, показанное на рисунке 3.59.

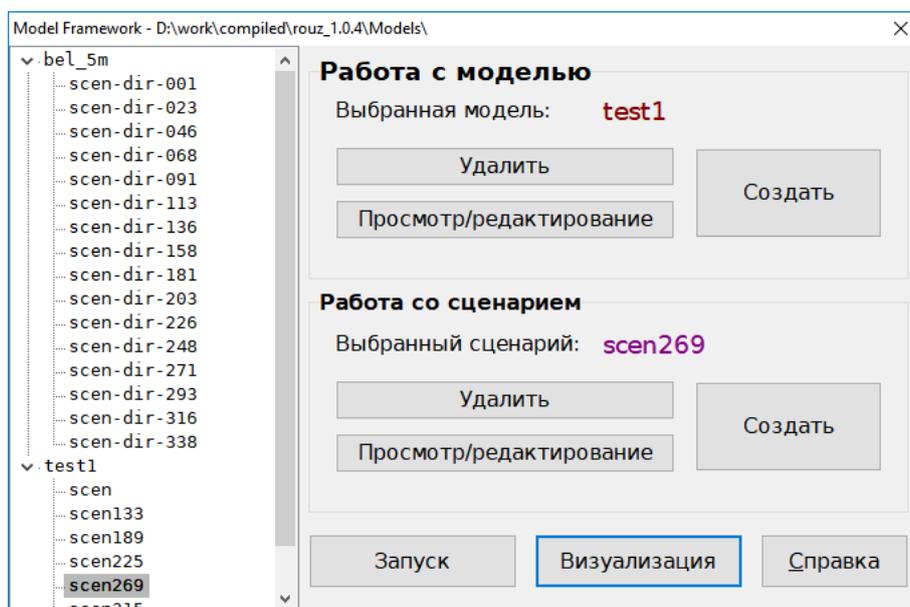


Рисунок 3.59. Окно программы *ModelFramework*

Программа *ModelFramework* предназначена для запуска остальных программных модулей ПС РОУЗ: *GeometryEditor*, *EditInp*, расчетного ядра, и *Simulator*. Подробное описание *ModelFramework* содержится в пункте 3.5.1.

3.8. Просмотр результатов моделирования

Программа *Simulator* представляет собой средство визуализации процесса распространения радиоактивного загрязнения или другой примеси в условиях произвольной трехмерной геометрии городской застройки или промышленного объекта при оценке рисков и прогнозирования последствий чрезвычайных ситуаций.

Данные для визуализации и расчета загружаются из заранее сформированных файлов (результатов расчета гидротермодинамического блока), содержащих информацию об объекте, полях ветра, температуры и концентраций радиоактивных газов/аэрозолей или другой примеси.

3.8.1. Основные понятия

В рамках ПС *Simulator* введем следующие определения:

- Ветер — вектор, состоящий из трех компонент скорости ветра и заданный на дискретной расчетной сетке. Визуализация ветра в некоторой плоскости, перпендикулярной одной из осей координат, осуществляется путем отрисовки проекции на эту плоскость трехмерных векторов поля ветра; при этом начало каждого вектора совпадает с соответствующим узлом расчетной сетки;
- Курсор — объект, к которому привязана камера локального трехмерного вида (возможен просмотр окружения в разных направлениях). Является кроме того точкой измерения концентраций изотопов, мощностей доз, отображаемых в панели управления. Также является точкой расчета интегральной дозы;
- Курсор «мыши» — Стандартный системный объект Windows; используется для определения позиции камеры в пространстве путем перемещения по экрану, а также вращения колесика «мыши» (приближение/удаление);
- Изоповерхность — трехмерные поверхности, представляющие собой геометрическое место точек с одинаковым значением параметра (концентрация или температура);
- Поверхность осаждения — окрашенная в соответствии с палитрой (легендой) внешняя поверхность всех объектов сцены, обращенная к атмосфере, отображающая поверхностную плотность выпадений аэрозоля;
- Палитра — структура данных, описывающая соответствие значений уровней и их цветов для визуализации изоповерхностей или цветных карт;
- Маркер — местонахождение условного наблюдателя в определенный момент времени. В этой точке записывается момент модельного времени, когда маркер был установлен и таблица значений концентрации радионуклидов, температуры, трех компонент скорости ветра, мощности дозы и накопленной дозы;
- Директория моделей — папка в файловой системе, в которой содержатся папки с различными моделями, в каждой из которых в свою очередь содержатся директории с различными сценариями распространения радиоактивной примеси;
- Директория модели — папка в файловой системе, в которой в виде нескольких файлов содержится информация, сформированная в *GeometryEditor*, и полностью описывающая геометрию гидротермодинамической задачи;
- Директория сценария — папка в директории модели, которая содержит всю необходимую информацию для проведения расчета как гидротермодинамики задачи, так и задачи переноса и осаждения примеси. Содержит копию файлов геометрии расчетной области из дочерней директории (модели), а также файлы, определяющие условия распространения (координаты, радионуклидный состав, интенсивность выброса, граничные условия на поле ветра, температуру и т. д.). После завершения работы гидротермодинамического блока содержит его выходные данные. В Директории сценария может находиться любое количество сценариев (в разных поддиректориях).

3.8.2. Расчет мощностей доз

Расчет мощностей доз и их интегрирование по времени осуществляется в расчетном ядре специальным программным блоком. Во все моменты времени, в которые были сохранены текущие поля объемных и поверхностных концентраций радионуклидов рассчитываются приземные горизонтальные поля мощностей доз от ингаляции, облака и поверхности. Поля доз

получаются интегрированием мощностей по времени. Все эти процедуры выполняются в расчетном ядре, до запуска постпроцессинга. В директории сценария создаются соответствующие файлы, которые считываются при постпроцессинге. Дозы/мощности доз рассчитываются в приповерхностном горизонтальном слое. В частности, мощность дозы и доза (интеграл от мощности) вычисляется в месте расположения «Курсора», который может перемещаться в пространстве с течением времени. При этом мощность дозы является характеристикой исключительно данной точки расчетной сетки, в то время как доза является еще и функцией траектории «Курсора». Мощность дозы в каждый момент времени рассчитывается в точке расположения «Курсора».

В вычислительном ядре рассчитывается мощность дозы от облака, загрязненной поверхности, за счет ингаляции (с вдыхаемым воздухом). Для первых двух типов облучения используется дозиметрическая модель облучения от точечного источника. Каждая воздушная ячейка расчетной сетки или расчетная ячейка на загрязненной поверхности рассматривается как точечный источник излучения. Для оценки мощности дозы от точечного источника используется модель, рекомендованная МАГАТЭ, в которой зависимость мощности дозы облучения от точечного источника от расстояния носит обратно-квадратичный характер. Это консервативный подход, в котором не учитываются такие эффекты как поглощение и переизлучение излучения в воздушной среде в условиях произвольной трехмерной застройки. Данные физические явления не могут быть учтены численным путем за приемлемое расчетное время, так как для каждой пары точек А и В вычисление мощности дозы в точке В от источника, расположенного в точке А, в условиях поглощения излучения произвольной застройкой, требует трехмерного моделирования. Мощность дозы от ингаляции — стандартная ингаляционная дозиметрическая модель, используемая в большинстве программных продуктов, предназначенных для оценки дозы облучения при поступлении радионуклидов в организм человека с вдыхаемым воздухом. Цветные карты мощностей доз и доз в приземном горизонтальном слое могут быть отображены пользователем в главном окне, аналогично тому, как отображаются цветные карты концентрации примеси. Для отображения доз служит специальное окно, вызываемое по команде главного меню «Радиационная обстановка».

3.8.3. Основные элементы интерфейса программы

- Основное окно *Simulator* — показывает трехмерное изображение местности из произвольно задаваемой точки обзора, с опциональным отображением ветра, цветных карт и изоповерхностей;
- Карта местности — отмечает текущее положение курсора;
- Локальный вид — отображение местности с позиции курсора;
- Осаждения — окно отображения поверхностной концентрации аэрозолей;
- Панель управления — управление курсором.

Основное окно

На рисунке 3.60 представлено главное окно ПС.

Основное окно *Simulator* состоит из:

- главного вида;
- главного меню;
- панели инструментов.

Главный вид отображает трехмерную картину объектов сцены расчетной области, сформированных в *GeometryEditor*, и курсор. Опционально возможно отобразить траекторию движения курсора, поставленные курсором маркеры, ветер, изоповерхности и сечения для ветра и концентрации, рассчитанные на основе входных сеток данных.

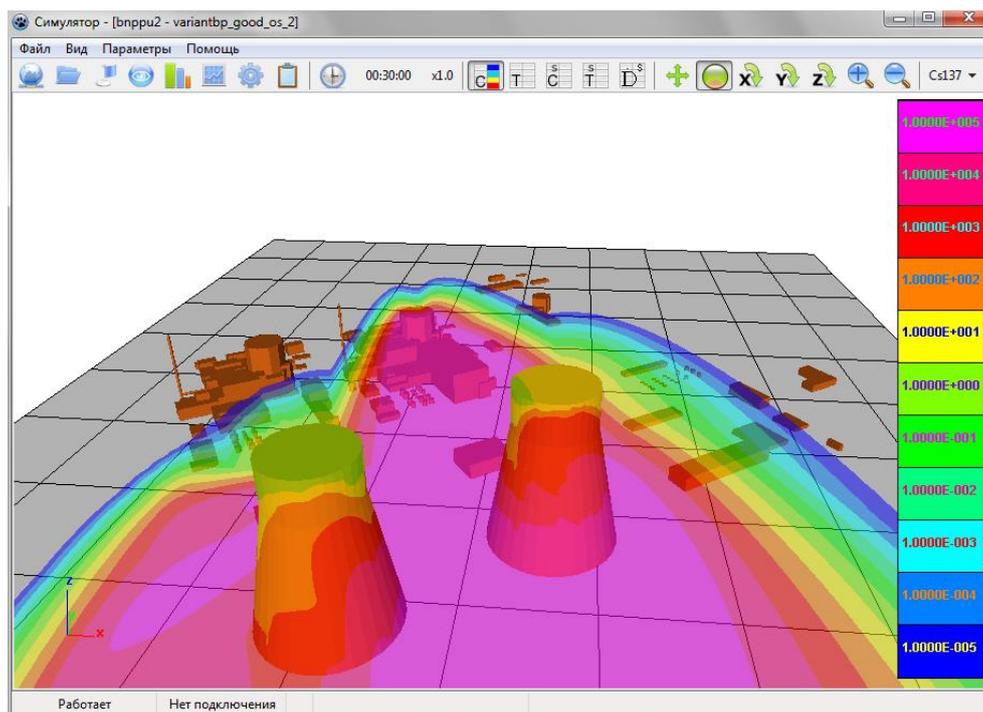


Рисунок 3.60. Главное окно ПС

Панель инструментов включает в себя следующие управляющие элементы:

- Открыть сценарий [Ctrl+O] — открытие диалога «Открыть сценарий»;
- Маркеры [Ctrl+O] — отображение/скрытие окна «Маркеры»;
- Локальный вид [Ctrl+L] — отображение/скрытие окна «Локальный вид»;
- Окно осаджений [Ctrl+S] — отображение/скрытие окна «Осадки»;
- Карта [Ctrl+M] — отображение/скрытие окна «Карта»;
- Настройки [Ctrl+Shift+P] — открытие диалога «Настройки»;
- Протокол — отображение/скрытие окна протокола;
- Ход времени [Shift+R] — включение/выключение хода времени;
- 00:30:00 Текущее время [Ctrl+J] — отображение и задание текущего времени;
- x1.0 Множитель времени — ускорение/замедление течения времени, в соответствии с заданным коэффициентом;
- панель, состоящая из пяти кнопок, которые в зависимости от нажатия на них позволяют производить отображение легенд изоповерхностей концентрации, температуры и легенд цветных карт концентрации, температуры, мощности дозы соответственно;
- Перемещение — переключение курсора «мыши» в режим перемещения камеры;
- Свободный обзор — переключение курсора «мыши» в режим свободного обзора;
- Вращение камеры — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг оси X;
- Вращение камеры — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг оси Y;

-  *Вращение камеры* — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг оси Z;
-  *Приблизить камеру* — перемещение камеры по направлению к точке, на которую она «смотрит»;
-  *Отдалить камеру* — перемещение камеры по направлению от точки, на которую она «смотрит»;
- **Cs137** ▾ *Выбор радионуклида* — выбор активного радионуклида из выпадающего списка для построения сечений и изоповерхностей на основе трехмерного поля значений его концентрации (в данном случае выбран ¹³⁷Cs).

Главное меню включает в себя следующие пункты меню.

8) Пункт меню «*Файл*» со следующими подпунктами:

- Открыть сценарий [Ctrl+O] — открытие диалога «Выбор сценария»;
- *Загрузить состояние* — загрузка параметров сеанса работы программы из специального *.lut файла;
- *Сохранить состояние* — запись основных параметров текущего сеанса работы программы в специальный *.lut файл;
- *Выход* [Alt+X] — завершение работы программы.

9) Пункт меню «*Вид*» со следующими подпунктами:

- *Осаждения* [Ctrl+S] — отображение/скрытие окна визуализации осадений;
- *Локальный вид* [Ctrl+L] — отображение/скрытие окна локального вида;
- *Карта* [Ctrl+M] — отображение/скрытие окна ортогональной проекции XY (вид сверху) расчетной области;
- *Маркеры* [Shift+M] — отображение/скрытие окна со списком маркеров и информации о них;
- *Протокол* [Shift+L] — отображение/скрытие окна со списком основных событий программы с фиксацией момента системного времени, в который они произошли;
- *Ветер* [Ctrl+W] — отображение/скрытие плоского сечения поля ветра в главном окне и в окне локального вида;
- *С-Изоповерхности* [Ctrl+E] — отображение/скрытие изоповерхностей концентрации активного радионуклида в главном окне и окне локального вида;
- *T-Изоповерхности* [Ctrl+T] — отображение/скрытие изоповерхностей температуры в главном окне и окне локального вида;
- *С-Сечения* [Ctrl+R] — отображение/скрытие цветных карт концентрации активного радионуклида (в заданной плоскости) в главном окне и окне локального вида;
- *T-Сечения* [Ctrl+Y] — отображение/скрытие цветной карты температуры (в заданной плоскости) в главном окне и окне локального вида;
- *Легенда* — отображение/скрытие легенды (цветовой палитры) в правой части главного окна для: изоповерхностей концентрации, температуры; цветных карт концентрации, температуры, мощности дозы (выбираются независимо друг от друга);
- *Перемещение* — переключение курсора «мыши» в режим перемещения камеры;
- *Свободный обзор* — переключение курсора «мыши» (камеры) в режим свободного обзора (вращение камеры в произвольном направлении);
- *Вращение камеры* — переключение курсора «мыши» (камеры) в режим вращения камеры вокруг оси X;

- *Вращение камеры* — переключение курсора «мыши» (камеры) в режим вращения камеры вокруг оси Y;
- *Вращение камеры* — переключение курсора «мыши» (камеры) в режим вращения камеры вокруг оси Z.

10) Пункт меню «*Параметры*» со следующими подпунктами:

- *Ход времени* [Shift+R] — включение/отключение хода времени;
- *Задать время* [Ctrl+J] — переход к моменту модельного времени, задаваемого пользователем в появляющемся диалоге;
- *Палитра C-изоповерхностей* [Shift+Ctrl+E] — открытие диалога редактирования легенды (и цветовой палитры) для изоповерхностей концентраций;
- *Палитра T-изоповерхностей* [Shift+Ctrl+T] — открытие диалога редактирования легенды (и цветовой палитры) для изоповерхностей температуры;
- *Палитра C-сечений* [Shift+Ctrl+R] — открытие диалога редактирования легенды (и цветовой палитры) для цветных карт концентраций;
- *Палитра T-сечений* [Shift+Ctrl+Y] — открытие диалога редактирования легенды (и цветовой палитры) для цветных карт температуры;
- *Палитра осаджений* [Shift+Ctrl+S] — открытие диалога редактирования легенды (и цветовой палитры) для визуализации поверхностной концентрации радионуклидов;
- *Настройки* [Shift+Ctrl+P] — открытие диалога основных настроек программы;
- *Синонимы имен радионуклидов* — открытие диалога редактирования синонимов названий радионуклидов (позволяет для каждого радионуклида задавать один или более псевдонимов);
- *Сечения дозы* — открытие диалога расчета двумерных полей мощности дозы в трех взаимно-перпендикулярных сечениях, которые будут отображены в главном окне и окне локального вида;
- *Автосброс *.bmp* (запуск/остановка) [Alt+P] — запуск/остановка специального потока (процедуры) в которой с определенной периодичностью, заданной пользователем, происходит сохранение содержимого окон визуализации (главное окно, окно локального вида, окно осаджений, карта — все опционально) в директорию screen_shots\.

11) Пункт меню «*Помощь*» с единственным подпунктом:

- *Справка* [F1] — Вызов справки по ПС.

Протокол

Для открытия окна «*Протокол*» воспользуйтесь пунктом меню «*Вид/Протокол*» или соответствующей кнопкой на панели инструментов главного окна. Вид окна «*Протокол*» представлен на рисунке 3.61.

Окно предназначено для отображения информации о событиях, произошедших в программе и записанных в текстовый файл *.log. Окно включает в себя следующие элементы:

- *События* — основная часть окна, в которой содержатся события работы программы с момента начала запуска программы;
- *Отображать* — группа флагов, которая позволяет задавать классы событий, подлежащих выводу в основную часть окна (события программы, расчета, движение камеры);
- *Выбрать папку* — задание папки, в которой будут сохраняться файлы событий;
- *Закреть* — закрыть данное окно.

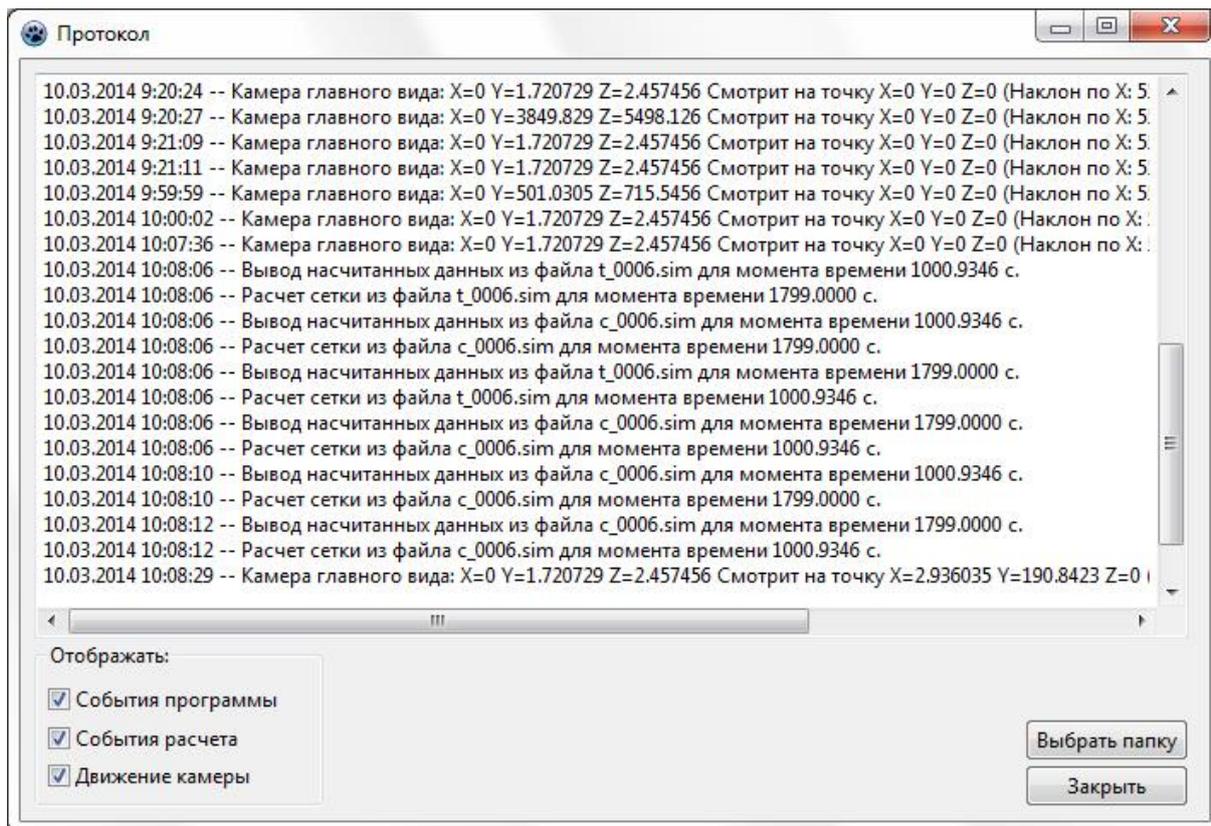


Рисунок 3.61. Окно «Протокол»

Выбор сценария

Для открытия диалога «Открыть сценарий» воспользуйтесь пунктом меню «Файл → Открыть сценарий» или соответствующей кнопкой на панели инструментов главного окна. Вид этого диалога представлен на рисунке 3.62.

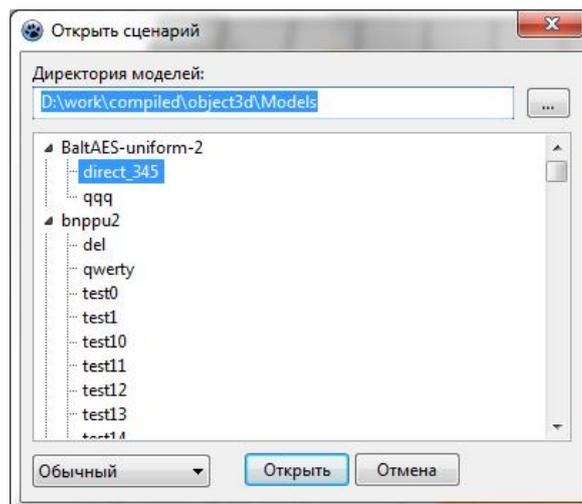


Рисунок 3.62. Диалог «Открыть сценарий»

Окно служит для загрузки любого сценария из заготовленных заранее для какой-либо трехмерной модели. Для того чтобы загрузить всю необходимую информацию в *Simulator* необходимо идентифицировать директорию моделей (в поле ввода в верхней части окна или кнопкой , открывающей стандартный диалог выбора директории).

Данная программа подразумевает наличие интегрирующей оболочки (*ModelFramework*) из которой, в частности, производится ее запуск. Однако эту программу можно запускать и независимо от оболочки в автономном режиме. Исполняемый файл *simulator_win64.exe* находится в корневой папке программы-оболочки. При запуске из оболочки в *Simulator* передается путь к директории моделей. При запуске из интегрирующей оболочки (*ModelFramework*) задавать директорию моделей не нужно, так как она задается в этом случае автоматически.

В главной части окна для выбранной директории моделей содержится двухуровневый список, на верхнем уровне которого содержатся все доступные модели, а на следующем уровне — все доступные сценарии распространения для конкретной модели.

Сценарий представляет собой набор данных, содержащий в совокупности следующую информацию:

- информацию о геометрии объекта;
- трехмерные массивы с информацией об объемной концентрации радионуклидов в расчетной области для разных моментов времени;
- 2-мерные массивы с информацией о поверхностной концентрации (осаждениях) аэрозолей для разных моментов времени;
- трехмерный массив поля температур в расчетной области;
- трехмерные массивы компонент скорости ветра в расчетной области;
- двумерные массивы мощностей доз облучения и интегральных доз в приземном горизонтальном слое.

Для выбора рабочей директории моделей необходимо нажать кнопку  или ввести путь вручную. Для загрузки сценария, необходимо выбрать сценарий в списке и нажать кнопку «Открыть». Для возврата к основному окну *Simulator* без загрузки сценария, необходимо нажать кнопку «Отмена».

Настройки

Для открытия диалога «Настройки» воспользуйтесь пунктом меню «Параметры/Настройки» или кнопкой на панели инструментов главного окна.

Окно состоит из нескольких вкладок, рассмотрим их по очереди.

Вкладки «С-изоповерхности» и «Т-изоповерхности» изображены на рисунках 3.63, 3.64 соответственно.

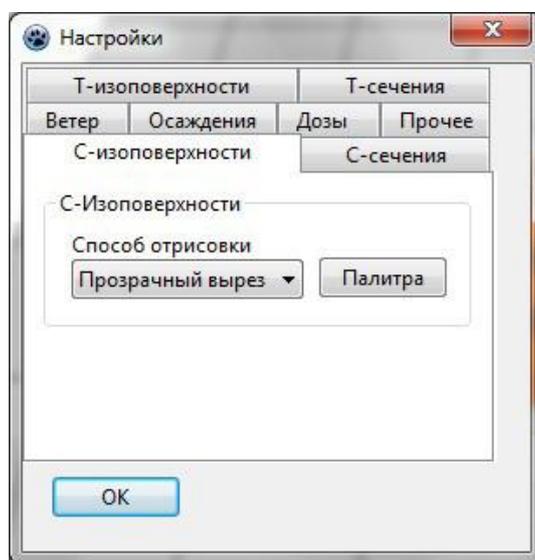


Рисунок 3.63. Вкладка «Т-изоповерхности» окна «Настройки»

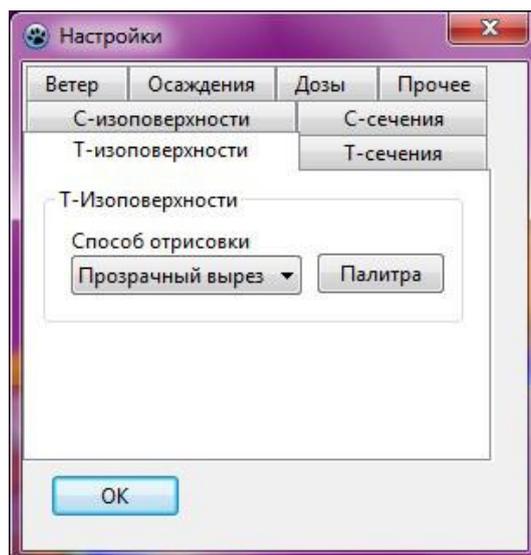


Рисунок 3.64. Вкладка «С-изоповерхности» окна «Настройки»

Эти вкладки служат для задания параметров отображения изоповерхностей температуры и концентрации.

В выпадающем списке «Способ отрисовки» можно выбрать следующие способы изображения поверхностей:

- *отключены* — отсутствие отрисовки;
- *линии* — изоповерхности отрисовываются цветной сеткой линий;
- *прозрачность* — изоповерхности отрисовываются соответствующим цветом с определенной степенью прозрачности, причем при рассмотрении как с внутренней, так и с внешней стороны;
- *прозрачный вырез* — отрисовываются изоповерхности соответствующим цветом с определенной степенью прозрачности, но только при рассмотрении из внутренней точки изоповерхности, при этом не происходит затенение внешними поверхностями.

Кнопка «Палитра» вызывает диалог редактирования соответствующей легенды (описание см. ниже).

На рисунках 3.65—3.67 представлены примеры визуализации изоповерхностей трехмерного поля концентрации способом «линии».

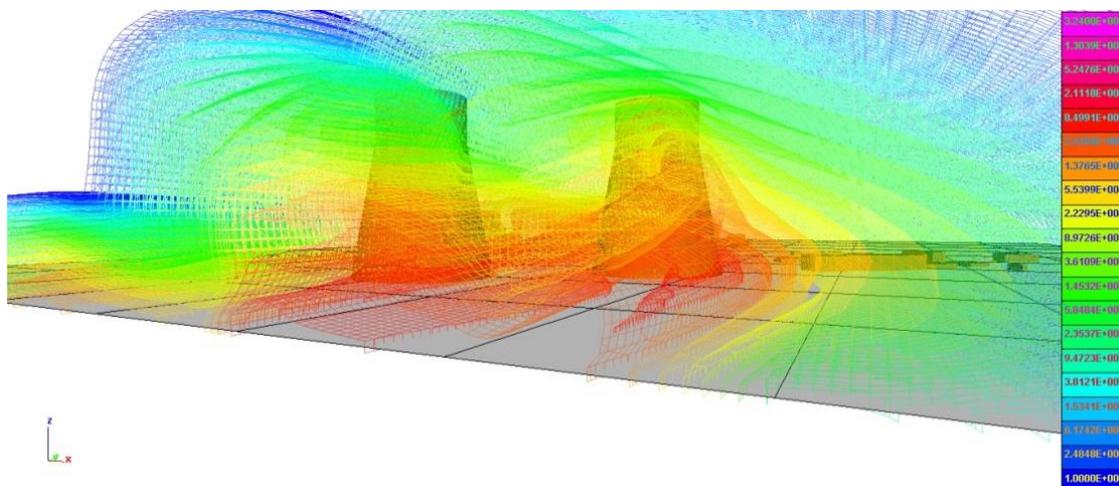


Рисунок 3.65. Тип визуализации изоповерхностей — «линии». Вид со стороны

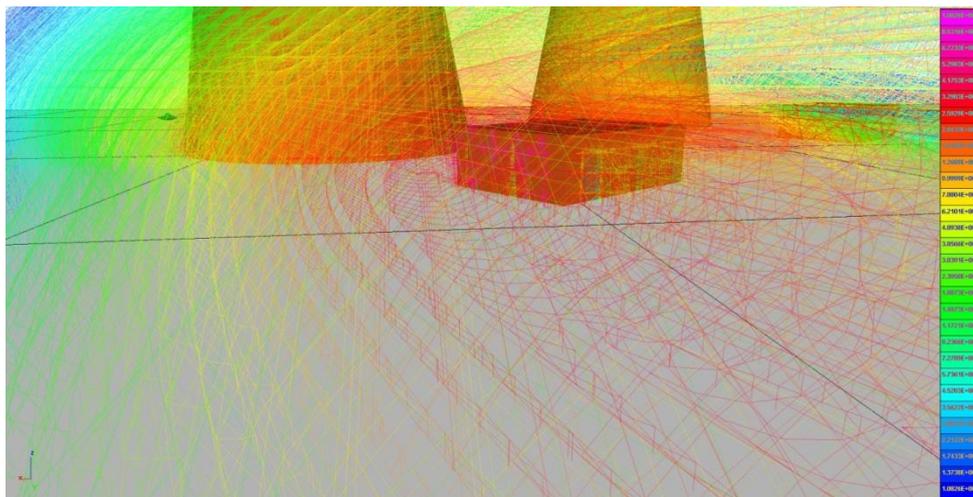


Рисунок 3.66. Тип визуализации изоповерхностей — «линии». Вид изнутри

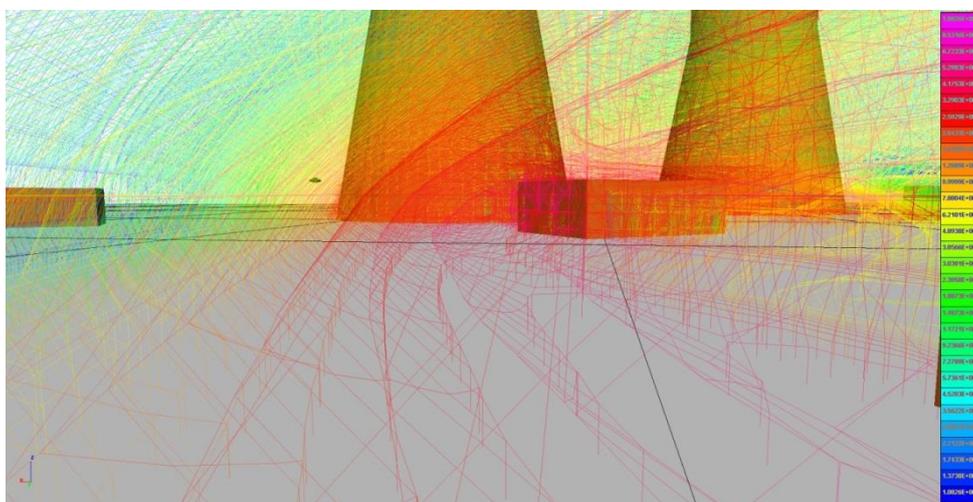


Рисунок 3.67. Тип визуализации изоповерхностей — «линии». Вид изнутри

Вкладки С-сечения и Т-сечений изображены на рисунках 3.68, 3.69 соответственно.

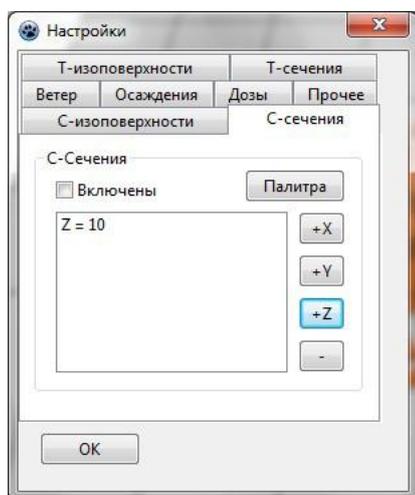


Рисунок 3.68. Вкладка «С-сечения» окна «Настройки»

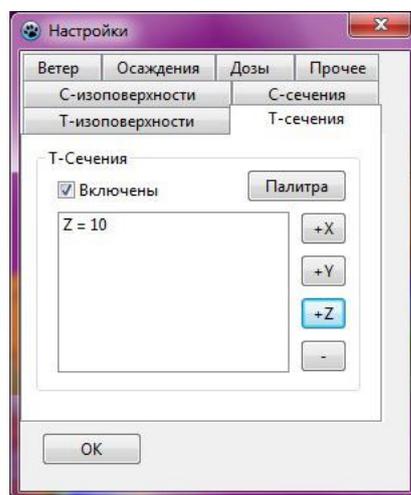


Рисунок 3.69. Вкладка «Т-сечения» окна «Настройки»

Эти вкладки служат для задания параметров отображения цветных карт температуры и концентрации соответственно в плоских сечениях, перпендикулярных одной из координатных осей:

- Флажок «Включены» служит для включения/выключения цветных карт в главном окне и окне локального вида;
- Кнопка «Палитра» вызывает диалог редактирования соответствующей легенды;
- Кнопки «+X», «+Y» и «+Z» служат для добавления в список сечений, расположенном слева, для отрисовки плоскости ($X=\text{const}$, $Y=\text{const}$, $Z=\text{const}$ соответственно), в которой будут показаны цветные карты. Количество сечений не ограничено;
- Кнопка  служит для удаления сечения, выделенного в списке слева.

На рисунке 3.70 приведены примеры визуализации цветных карт концентрации в 3 взаимно-перпендикулярных сечениях, пересекающихся вдоль прямых, параллельных осям координатной системы.

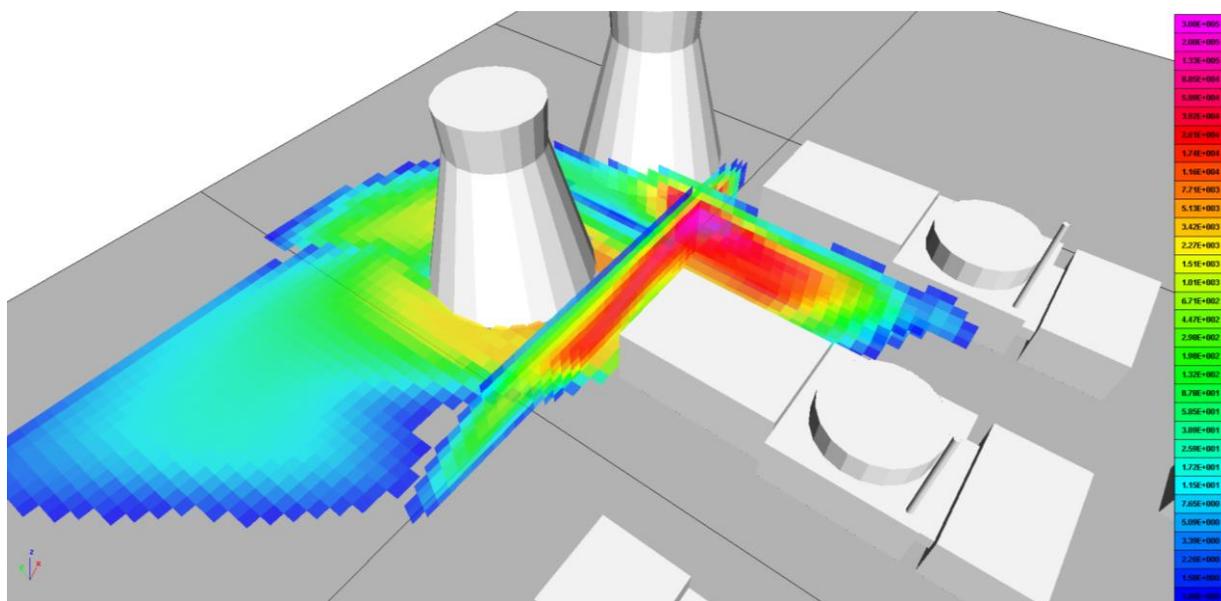


Рисунок 3.70. Визуализация цветных карт концентрации в двух плоских взаимно перпендикулярных сечениях (в плоскости $Z=\text{const}$ и $X=\text{const}$)

Вкладка «Ветер» служит для задания параметров визуализации ветра в плоском сечении, перпендикулярном одной из осей координат. Вкладка показана на рисунке 3.71.

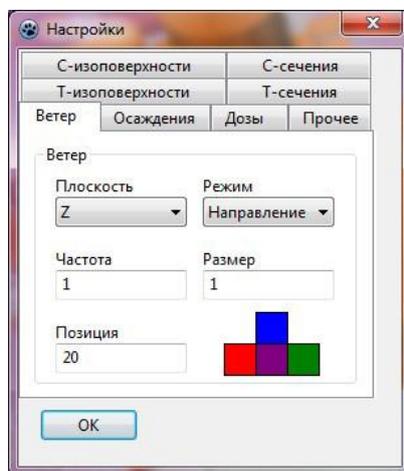


Рисунок 3.71. Вкладка «Ветер» окна «Настройки»

- Выпадающий список «Плоскость» позволяет выбрать плоскость, отображающую проекцию поля ветра, а также отключить визуализацию, если она не нужна;
- Выпадающий список «Режим» позволяет задать способ отрисовки плоского поля: «Один цвет» (все вектора рисуются одним цветом); «Величина» (все векторы имеют один размер и поэтому показывают только направление скорости; окраска же показывает ее модуль); «Направление» (цвет каждого вектора скорости определяется его направлением);
- Поле «Частота» позволяет задать периодичность (единица измерения — индекс элемента массива) в двумерном массиве проекции скорости ветра, с которой будет отображаться поле векторов. Например, при значении частоты 0,5 будет отрисовываться только каждый второй вектор;
- Поле «Размер» задает коэффициент при длине вектора;
- В поле «Позиция» содержится константа уравнения плоскости (например, $Z=20$);
- В нижней правой части вкладки содержится набор цветов, используемый при отрисовке векторов.

На рисунках 3.72—3.74 представлена визуализация горизонтальной проекции поля ветра в горизонтальной плоскости при разных режимах цветовой отрисовки.

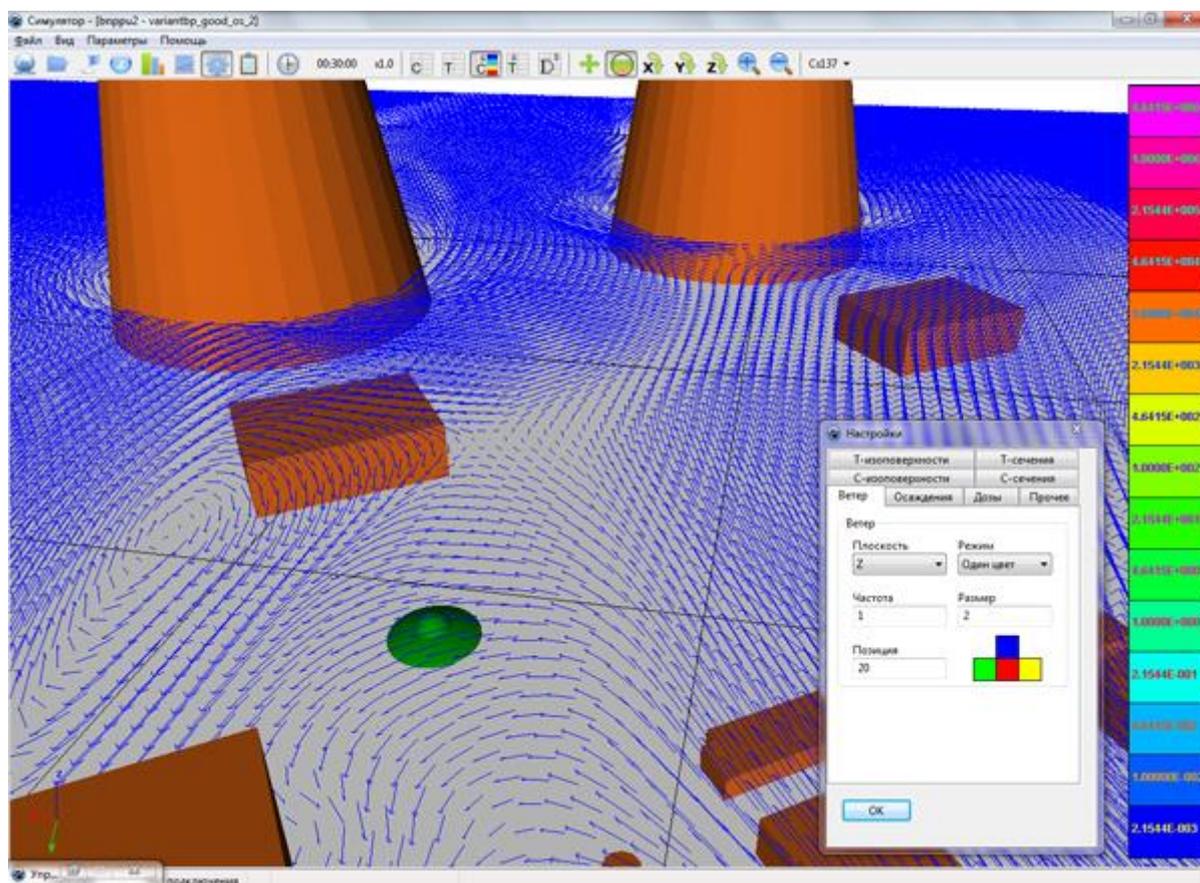


Рисунок 3.72. Горизонтальная проекция скорости ветра в горизонтальном сечении в режиме «Один цвет»

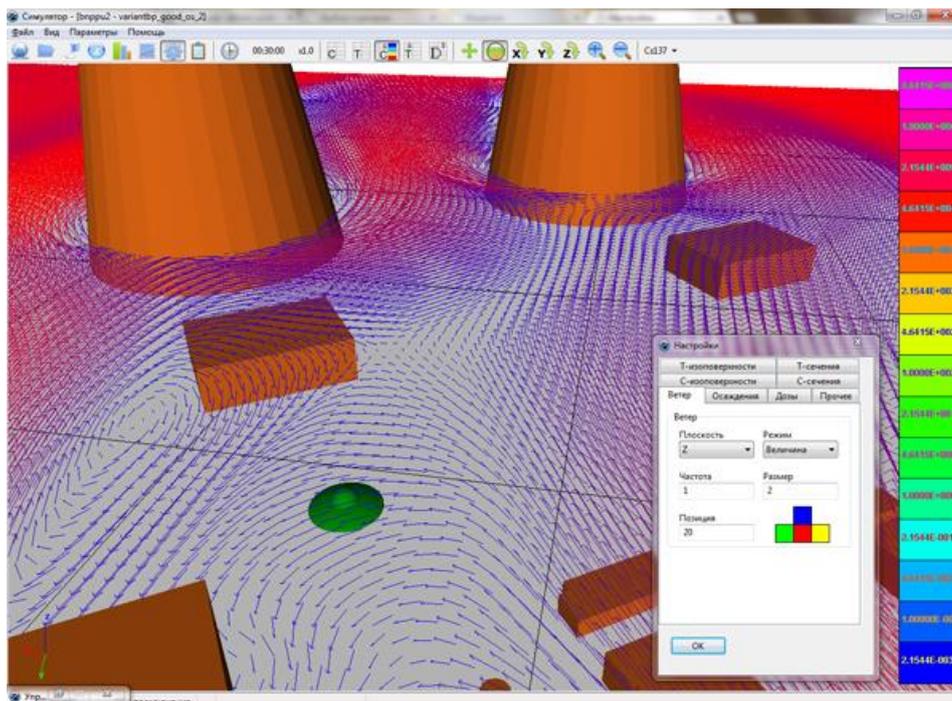


Рисунок 3.73. Горизонтальная проекция скорости ветра в горизонтальном сечении в режиме «Величина» (длина стрелок пропорциональна горизонтальной проекции скорости ветра)

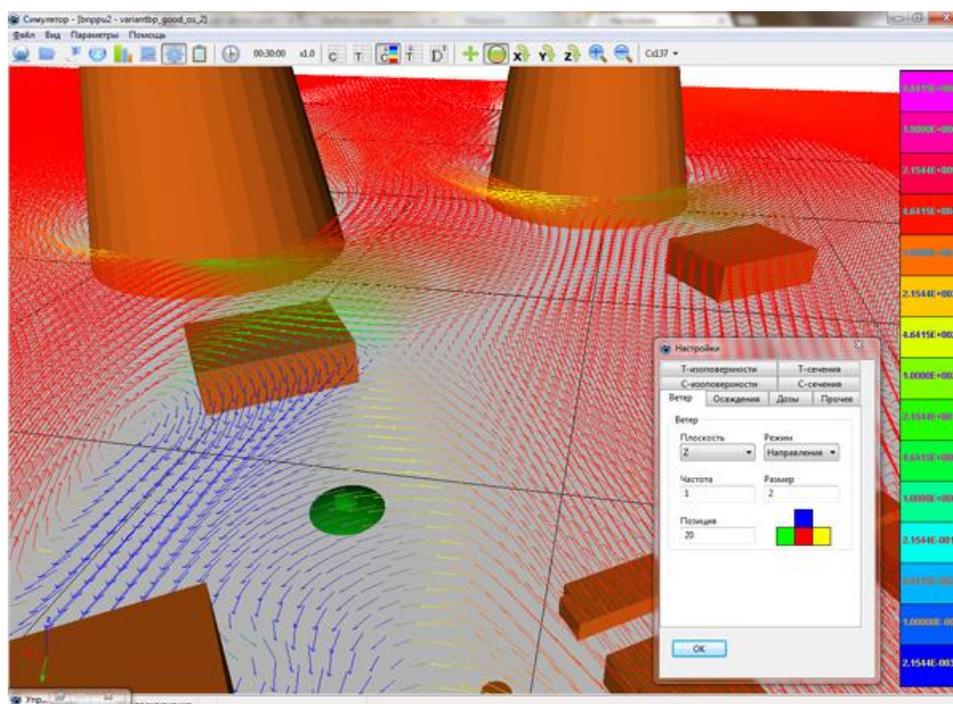


Рисунок 3.74. Горизонтальная проекция скорости ветра в горизонтальном сечении в режиме «Направление» (длина стрелок пропорциональна горизонтальной проекции скорости ветра)

Вкладка «Осаждения» служит для задания параметров визуализации осаджений. Задача визуализации осаджений сводится к нанесению окраски в соответствии с легендой поверхности трехмерных объектов, а также подстилающей поверхности, настройка которой производится в окне редактирования легенды, вызываемом по нажатию кнопки «Палитра». Вкладка «Осаждения» показана на рисунке 3.75.

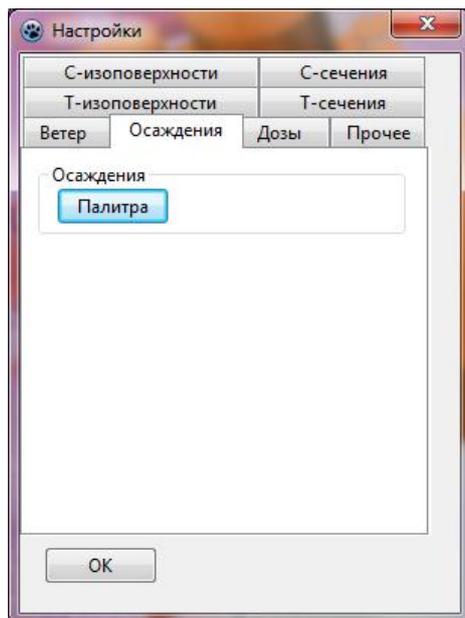


Рисунок 3.75. Вкладка «Осадки» окна «Настройки»

На рисунках 3.76—3.82 приведены примеры визуализации осадений на промплощадке.

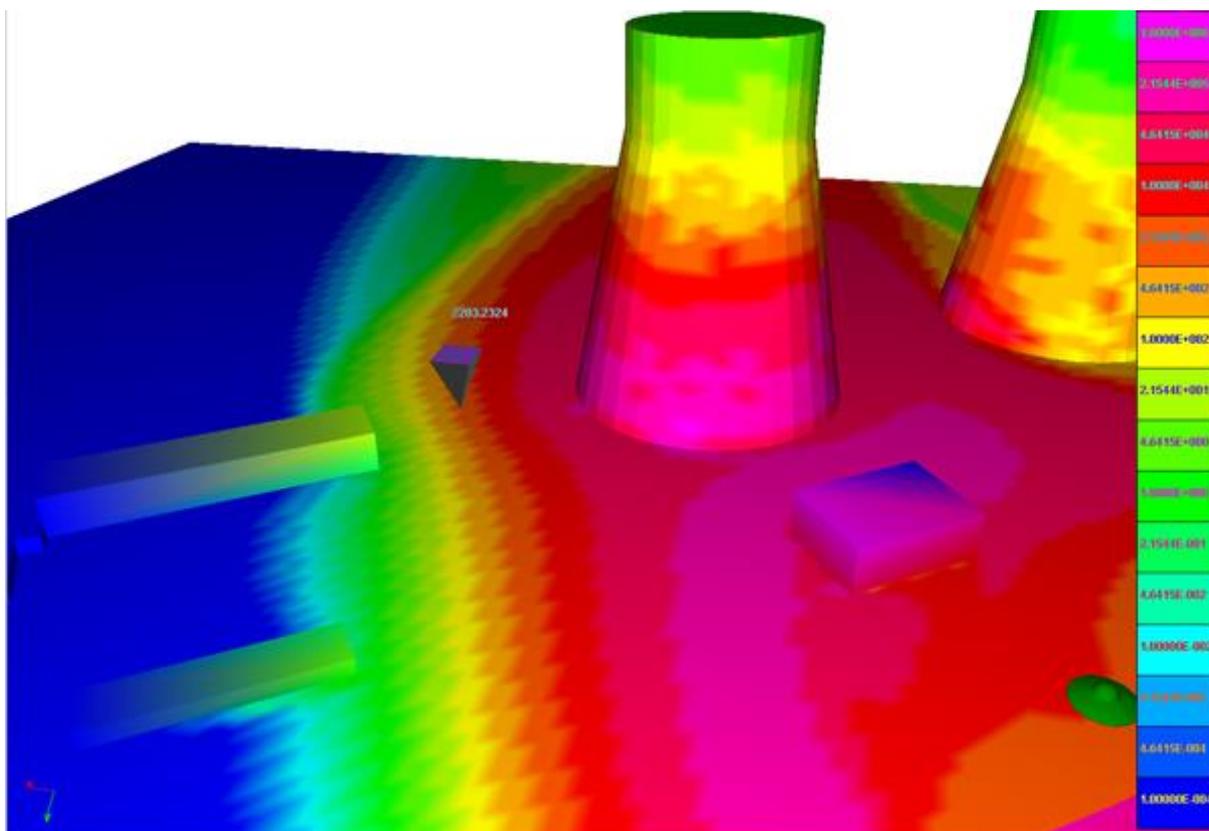


Рисунок 3.76. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация с освещением. Точка обзора расположена примерно в центре расчетной области

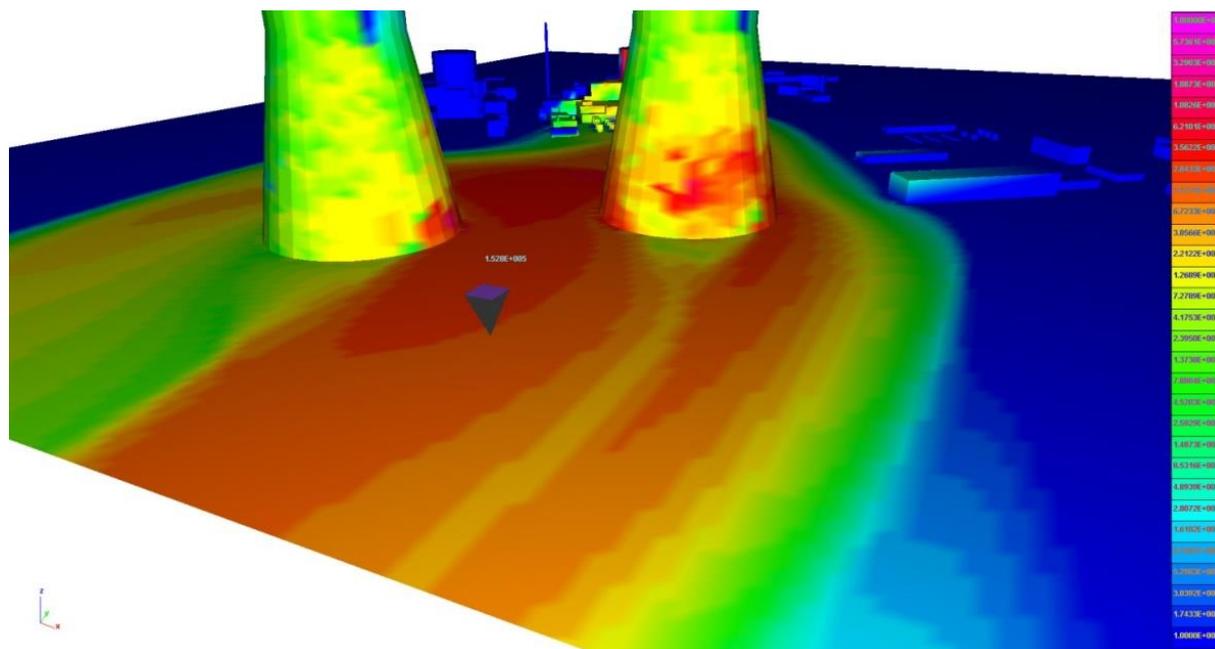


Рисунок 3.77. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация с освещением. Точка обзора расположена на границе расчетной области

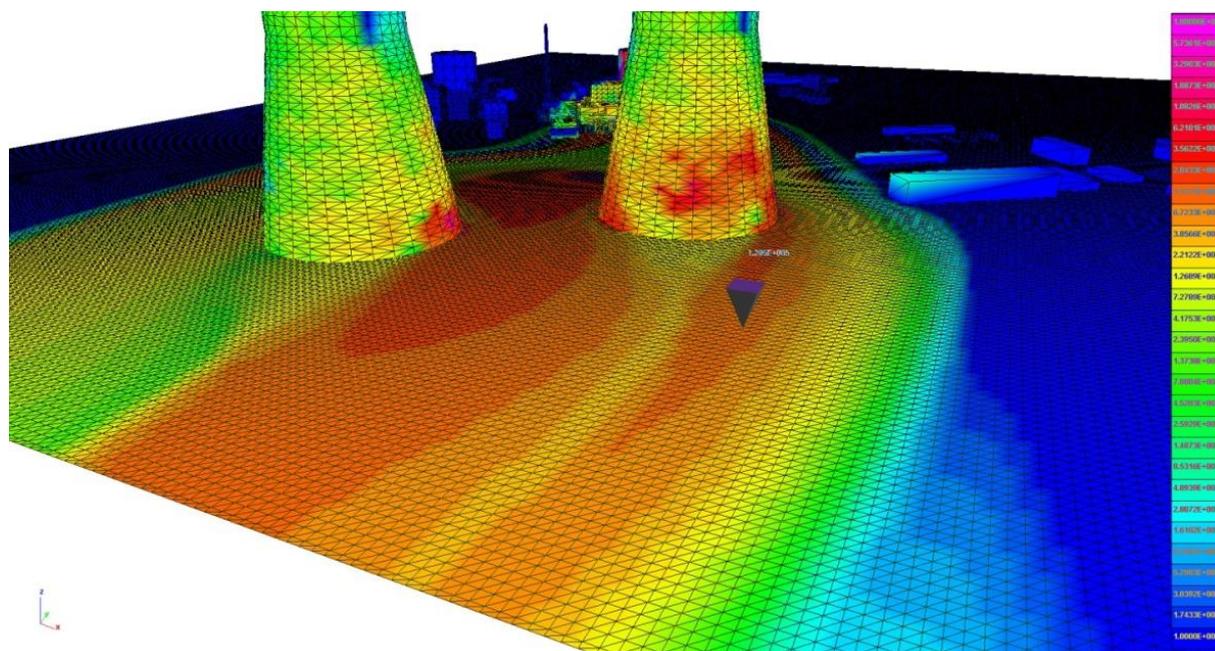


Рисунок 3.78. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация без освещения. Точка обзора расположена на границе расчетной области

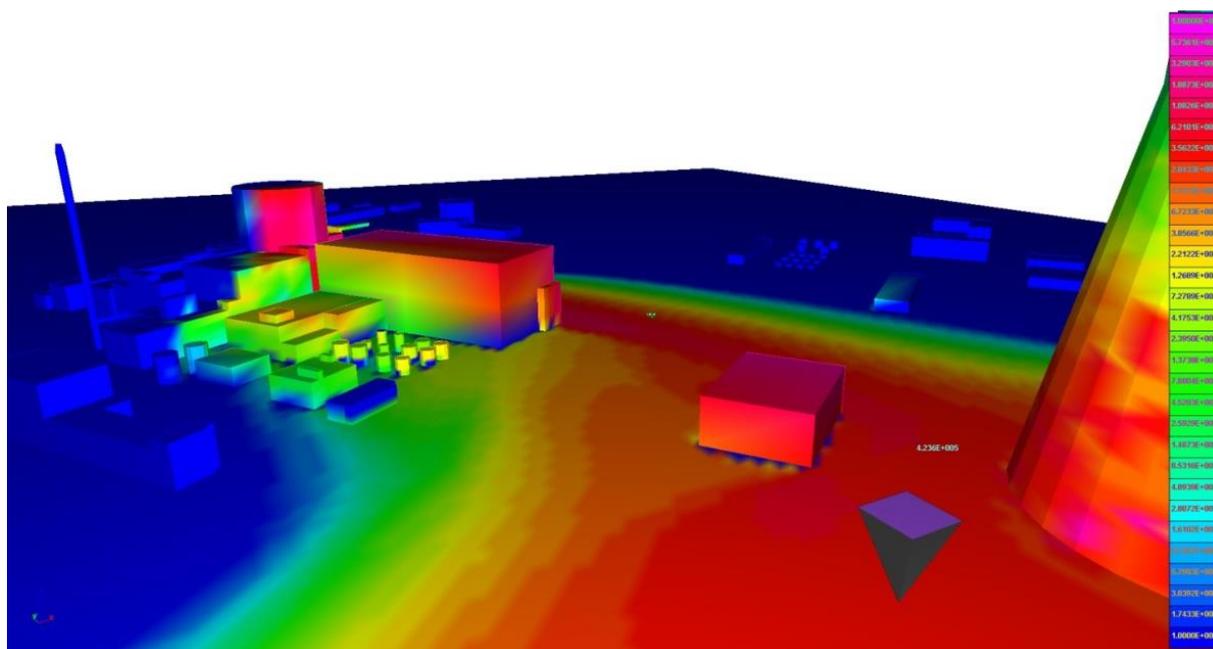


Рисунок 3.79. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация с освещением. Точка обзора расположена между градирнями

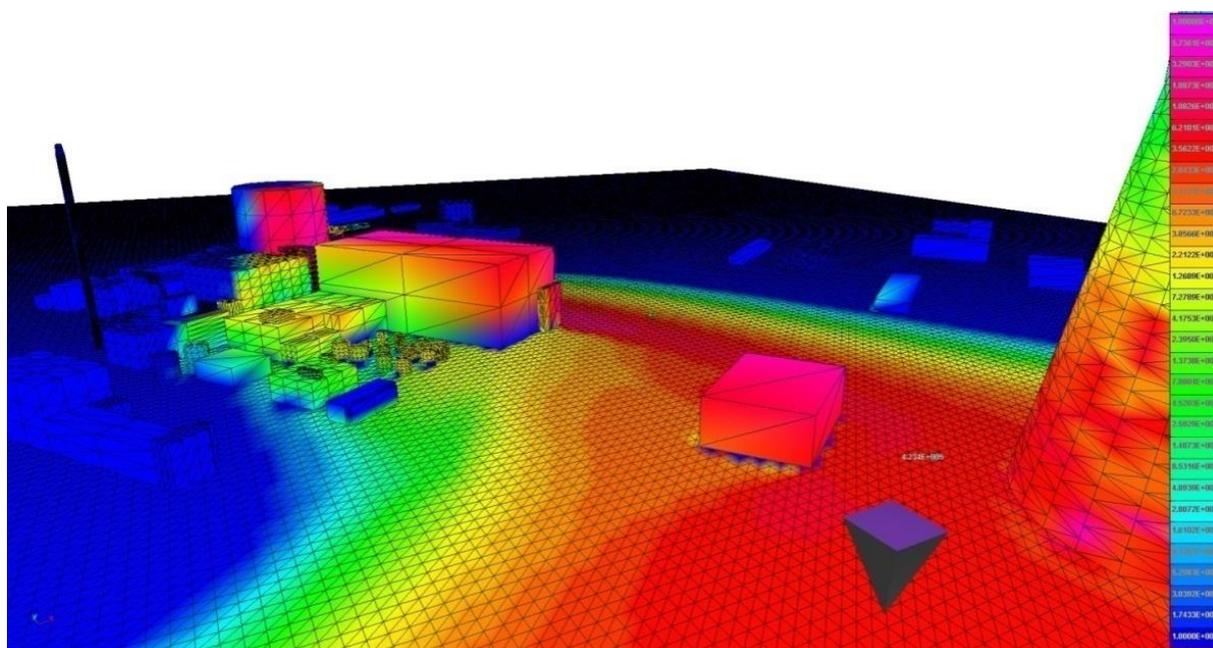


Рисунок 3.80. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация без освещения. Точка обзора расположена между градирнями

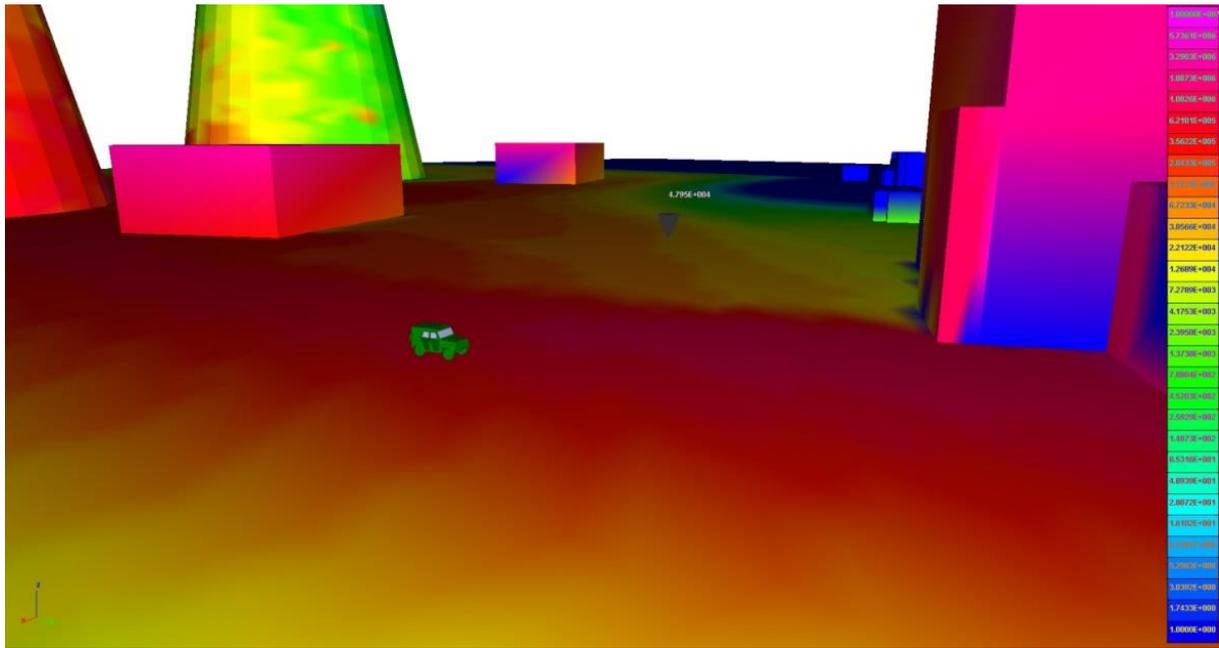


Рисунок 3.81. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация с освещением. Точка обзора расположена вблизи здания с реактором

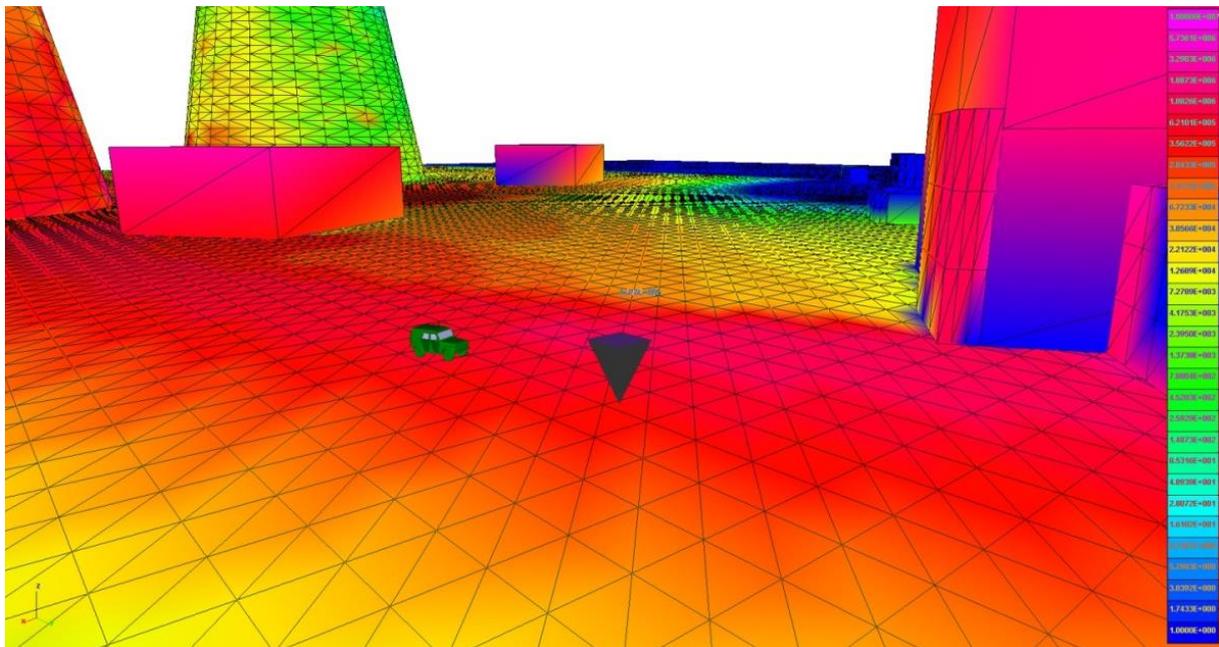


Рисунок 3.82. Визуализация поверхностной плотности осадений аэрозолей на поверхностях объектов застройки и подстилающей поверхности. Визуализация без освещения. Точка обзора расположена вблизи здания с реактором

Вкладка «Дозы» предназначена для задания параметров расчета мощности дозы. Вкладка изображена на рисунке 3.83.

- Флаг «*Расчитывать дозу для курсора*» служит для включения/выключения процедуры расчета мощности дозы для курсора. Доза «курсор» есть доза, которую получил бы наблюдатель, если бы все время находился в точке, в которой находится «курсор», как в случае его покоя, так и в случае его движения. Данная опция позволяет реализовать заявленную возможность расчета интегральной дозы при движении по произвольной траектории с произвольной скоростью, кратной 1 м/с. Период интегрирования дозы равен периоду, когда был запущен «Таймер».
- Выпадающие списки «*Возрастная категория*» и «*Орган*» задают параметры для отображения мощности дозы и дозы от ингаляции в панели управления курсором и в главном окне при визуализации приземного поля дозы/мощности дозы.
- Флаг «*сохранять дозы курсора в файле*» позволяет сохранять временную динамику мощностей доз, «*получаемых*» курсором в файл doses\hereisdoses.txt.

Вкладка «*Прочее*» содержит некоторые параметры визуализации, как показано на рисунке 3.84.

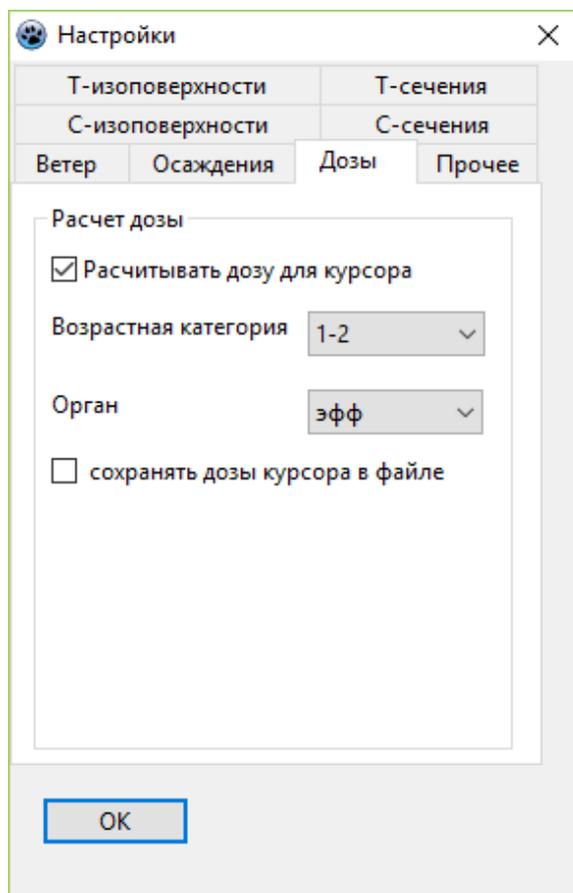


Рисунок 3.83. «Дозы» окна «Настройки»

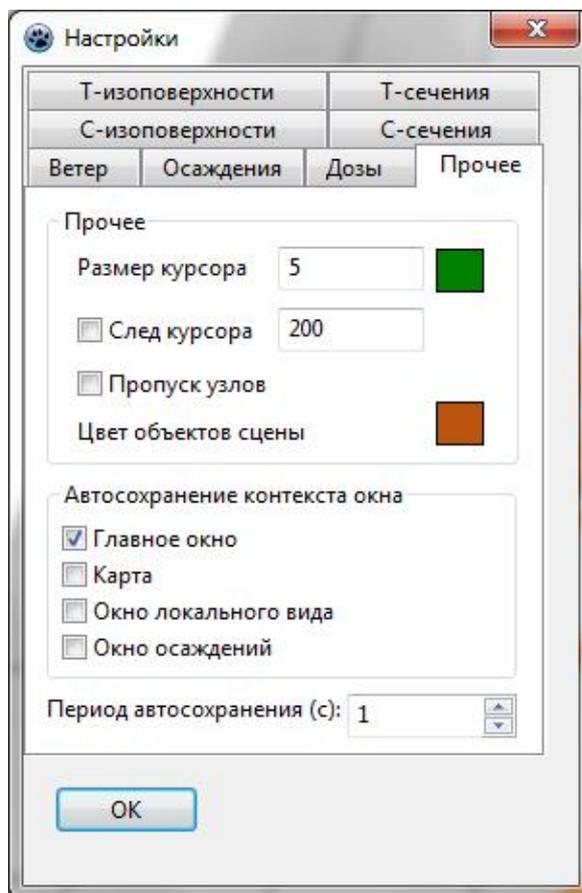


Рисунок 3.84. Вкладка «Прочее» окна «Настройки»

- Поле «*Размер курсора*» задает относительный размер курсора (в единицах расстояния, а не пикселей), с которым он будет изображаться в окне главного вида. Справа от этого поля содержится поле редактирования цвета курсора.
- Поле «*След курсора*» задает максимальную длину траектории курсора — линии в трехмерном пространстве, отображаемой в главном окне и окне локального вида.

На рисунке 3.85 представлена часть траектории (следа) курсора типа НЛЮ длиной 1600 м.

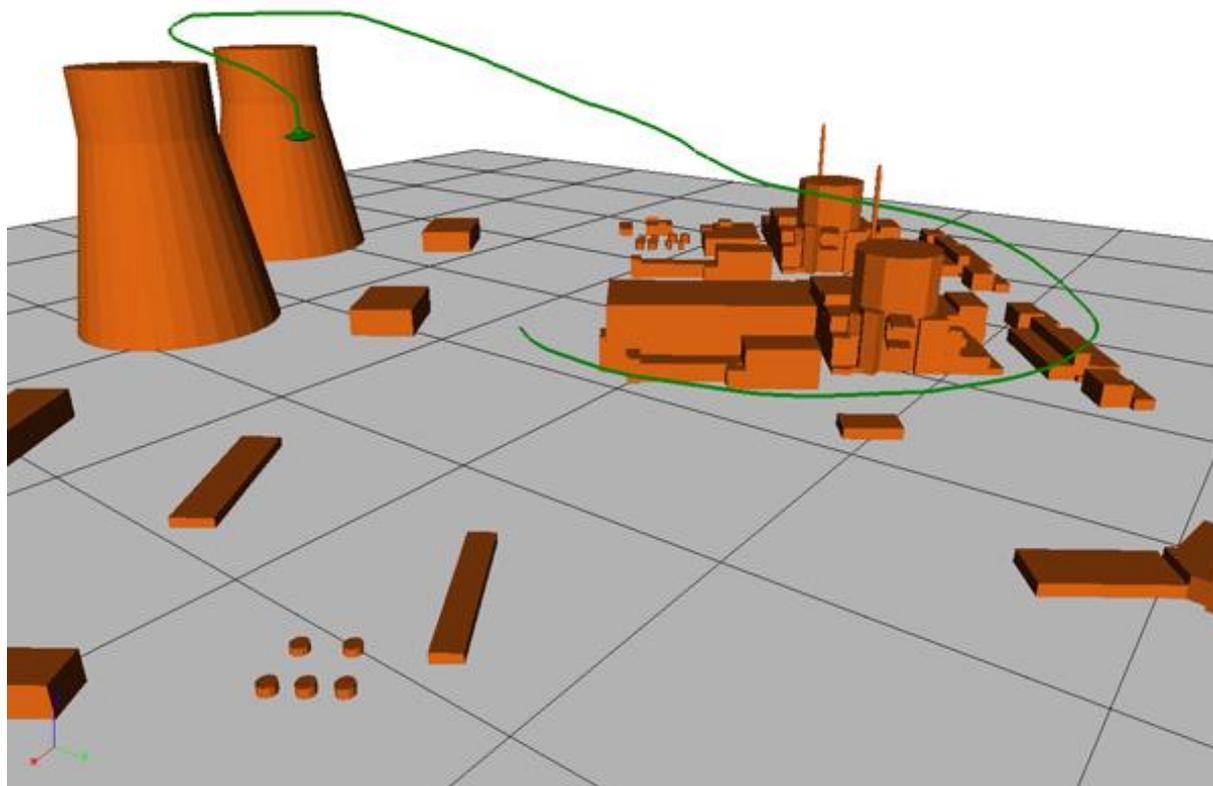


Рисунок 3.85. Часть траектории курсора длиной 1600 м

- Флаг «Пропуск узлов» позволяет задать режим работы программы, в котором сетка входных параметров (трехмерных полей концентраций и температур) разряжается в 2 раза по каждому направлению, что позволяет ускорить работу программы.
- Поле ввода «Цвет объектов сцены» позволяет задать цвет, в который окрашиваются трехмерные объекты.
- Автосохранение контекста окна — это список флагов, позволяющий задать список окон визуализации, содержимое которых будет автоматически сбрасываться в графические файлы (в папку \screen_shots) с периодом по времени, задаваемом в поле «Период автосохранения».

Маркеры

Для открытия окна «Маркеры» воспользуйтесь кнопкой  на панели инструментов главного окна. Пример этого окна со списком, состоящим из 3 маркеров, представлен на рисунке 3.86.

#	Время	Позиция	T	Ветер	Доза	Накопленная доза	Cs137
1	00:00:08	831.5; 534.9; 10.0	300	0.32; 3.10; 0.00	0.00E+000	0.00E+000	8.84E-005
2	00:00:11	838.0; 534.9; 10.0	300	0.35; 3.11; 0.00	0.00E+000	0.00E+000	8.65E-005
3	00:00:14	851.9; 535.2; 10.0	300	0.40; 3.17; 0.00	0.00E+000	0.00E+000	2.11E-005

Рисунок 3.86. Окно «Маркеры»

Окно «Маркеры» предназначено для отображения информации о поставленных пользователем маркерах. Для добавления нового маркера воспользуйтесь кнопкой F2 или кнопкой «+Маркер» на панели управления курсором. В окне «Маркеры» содержится следующая информация по каждому маркеру:

- *Цвет* — цвет курсора пользователя.
- *Номер* — порядковый номер маркера;
- *Время* — момент времени, в который был поставлен маркер;
- *Позиция* — геометрические координаты маркера;
- *Температура* — значение температуры в точке нахождения маркера в момент его установки;
- *Ветер* — значения компонент скорости ветра в точке нахождения маркера в момент установки;
- *Доза* — значение дозы, получаемой курсором в единицу времени (мощность дозы) в момент установки маркера;
- *Накопленная доза* — значение дозы, «полученной курсором» до момента установки маркера.

Концентрации изотопов — значения концентраций всех изотопов сценария выброса в точке нахождения маркера в момент его установки.

Синонимы имен радионуклидов

Для открытия окна «Синонимы имен радионуклидов» воспользуйтесь пунктом меню «Параметры/Синонимы имен радионуклидов». Вид этого окна показан на рисунке 3.87.

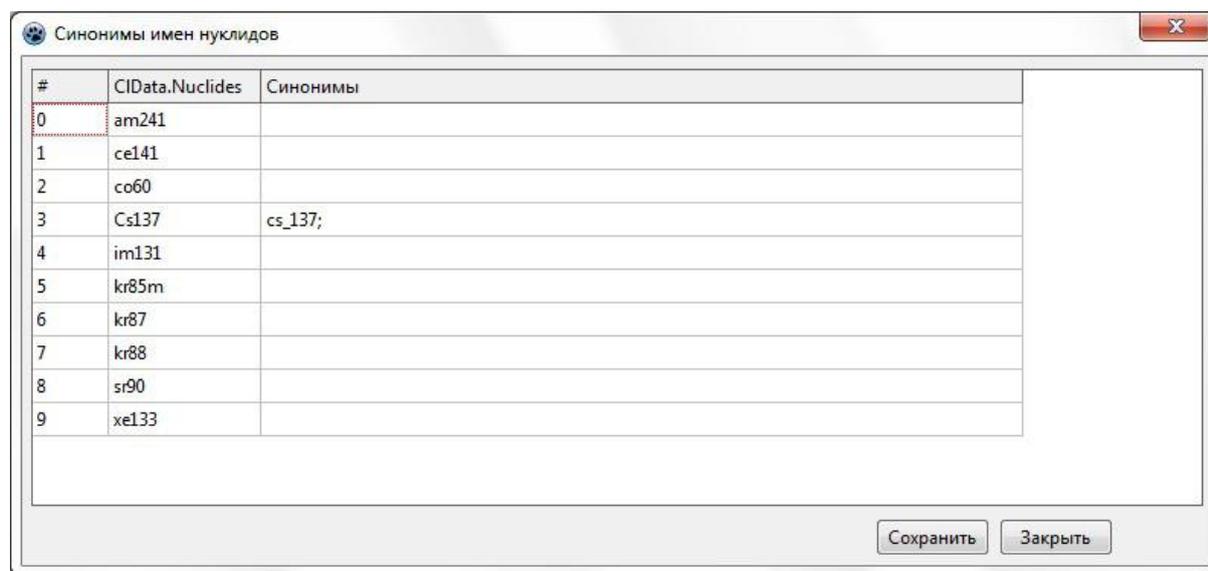


Рисунок 3.87. Окно «Синонимы имен радионуклидов»

Окно «Синонимы имен нуклидов» предназначено для отображения информации о дополнительных именах, поставленных в соответствие оригинальным именам нуклидов из базы данных по нуклидам (директория nuclid_database\ — информация по каждому нуклиду содержится в текстовом файле, имя которого, без расширения, соответствует имени нуклида). Окно состоит из 3 столбцов. Первый — порядковый номер радионуклида, второй — его оригинальное название, третий — список синонимов через точку с запятой.

Окно включает кнопки:

- *Сохранить* — сохранение текущего списка синонимов (в специальный файл). Этот список будет учтен при следующей загрузке программы;
- *Закреть* — завершить редактирование, сохранить и выйти.

Радиационная обстановка

Для отображения цветных карт мощностей доз или доз облучения в приземном горизонтальном слое в главном окне визуализации, необходимо задать интересующий момент времени, тогда актуальные массивы данных загрузятся из соответствующих файлов на диске в оперативную память программы. После этого для настройки параметров отображения необходимо открыть диалоговое окно «Радиационная обстановка» с помощью одноименной команды главного меню. Перед пользователем появится соответствующее окно (рисунок 3.88):

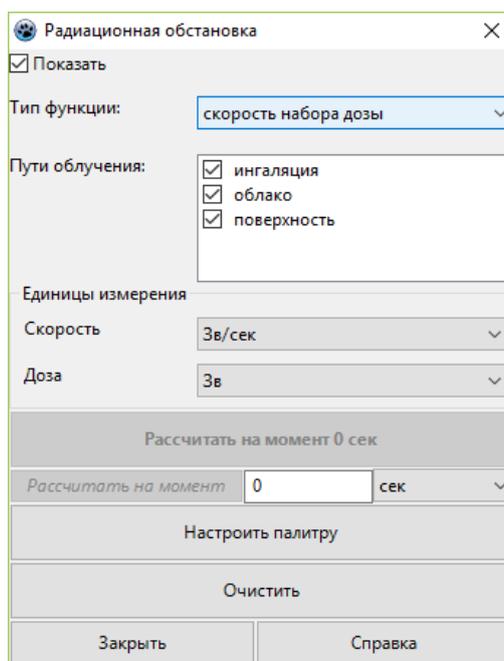


Рисунок 3.88. Окно «Радиационная обстановка»

Предназначение элементов окна:

Флаг «Показать» регулирует показ цветных карт (включен/выключен).

С помощью выпадающего списка «Тип функции» задается отображаемая с помощью цветных карт величина: скорость набора дозы (мощность дозы) или интегральная доза (проинтегрированную по времени).

Список флагов «Пути облучения» задает, какие пути (от ингаляции, от облака, от загрязненной поверхности) будут учитываться при получении значений дозы/мощности дозы на расчетной сетке, а какие нет. Если выбрать какой-то один пункт, то будет показана доза/мощность дозы именно по этому пути.

В выпадающих списках «Скорость» и «Доза» панели «Единицы измерения» задаются единицы измерения, в которых будут представлены значения мощностей доз и доз соответственно. При этом картина заказанной функции отображается в главном окне.

При нажатии на кнопку «Настроить палитру» перед пользователем появляется диалоговое окно для настройки палитры, которая будет использована для отображения картины дозы/мощности дозы.

Кнопка «Рассчитать на момент» позволяет получить значение дозы за период времени от начала аварии до момента указанного пользователем справа от этой кнопки с учетом распада радионуклидов. В выпадающем списке справа от поля ввода задаются единицы измерения момента времени (например, 1 год). Если тип отображаемой функции «Скорость набора дозы» (мощность дозы), то будет вычислена мощность дозы на этот момент времени, также с учетом распада радионуклидов.

Кнопка «Очистить» обнуляет значение дозы/мощности дозы и убирает картину из главного экрана.

Кнопка «Закрыть» закрывает окно редактирования параметров отображения радиационной обстановки.

Таким образом, данное окно позволяет в интерактивном режиме с помощью главного окна визуализации показать радиационную обстановку на объекте.

В качестве примера визуализации картины мощности дозы, приведем распределения мощности дозы от загрязненной аэрозолями ^{137}Cs поверхности зданий (рисунок 3.89):

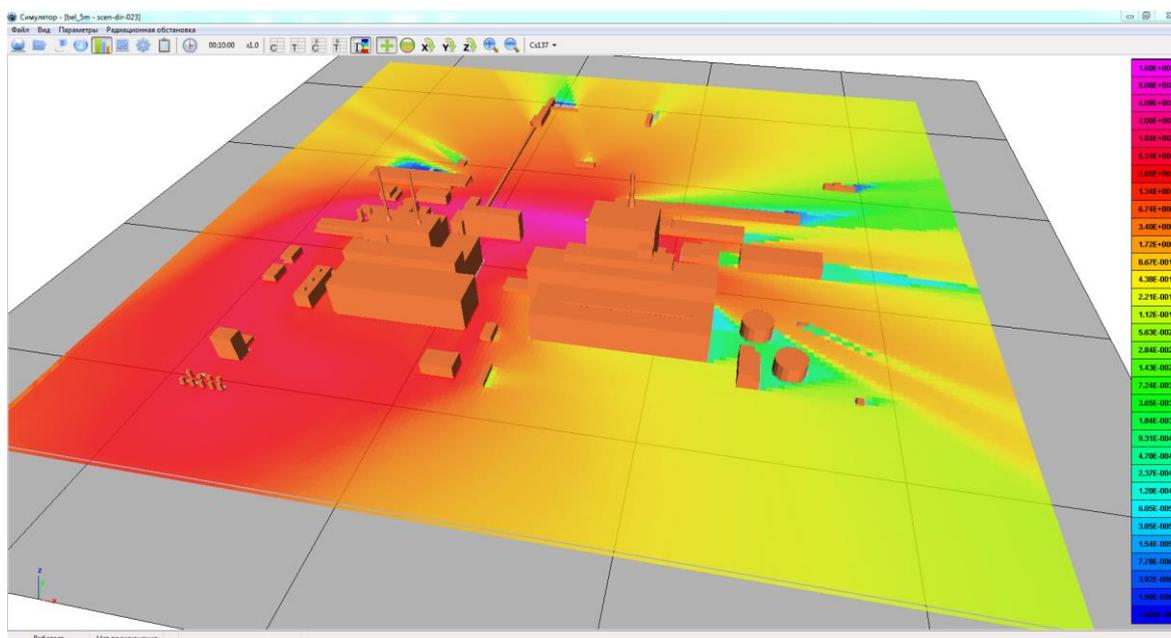


Рисунок 3.89. Мощности дозы от загрязненной поверхности

Загрязнение поверхности, приводящее к такой картине распределения мощности дозы от поверхности, приведено на рисунке 3.90:

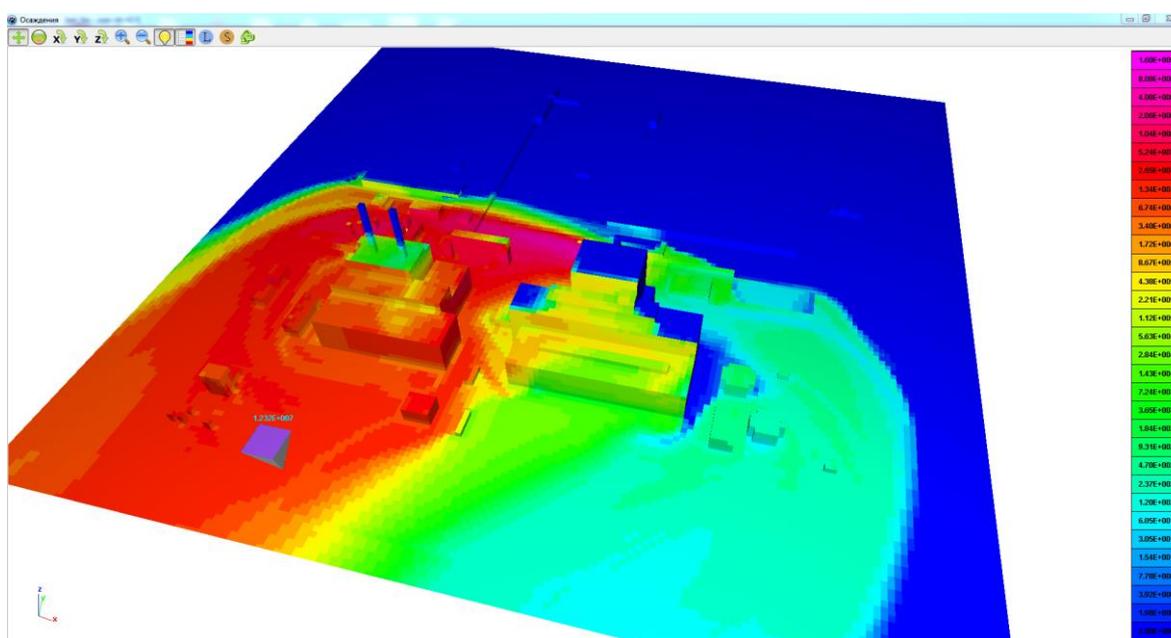


Рисунок 3.90. Картина загрязнения подстилающей поверхности и поверхностей застройки

3.8.4. Карта

Для открытия окна «Карта» воспользуйтесь пунктом меню «Вид/Карта» или кнопкой  на панели инструментов главного окна. Вид этого окна представлен на рисунке 3.91.

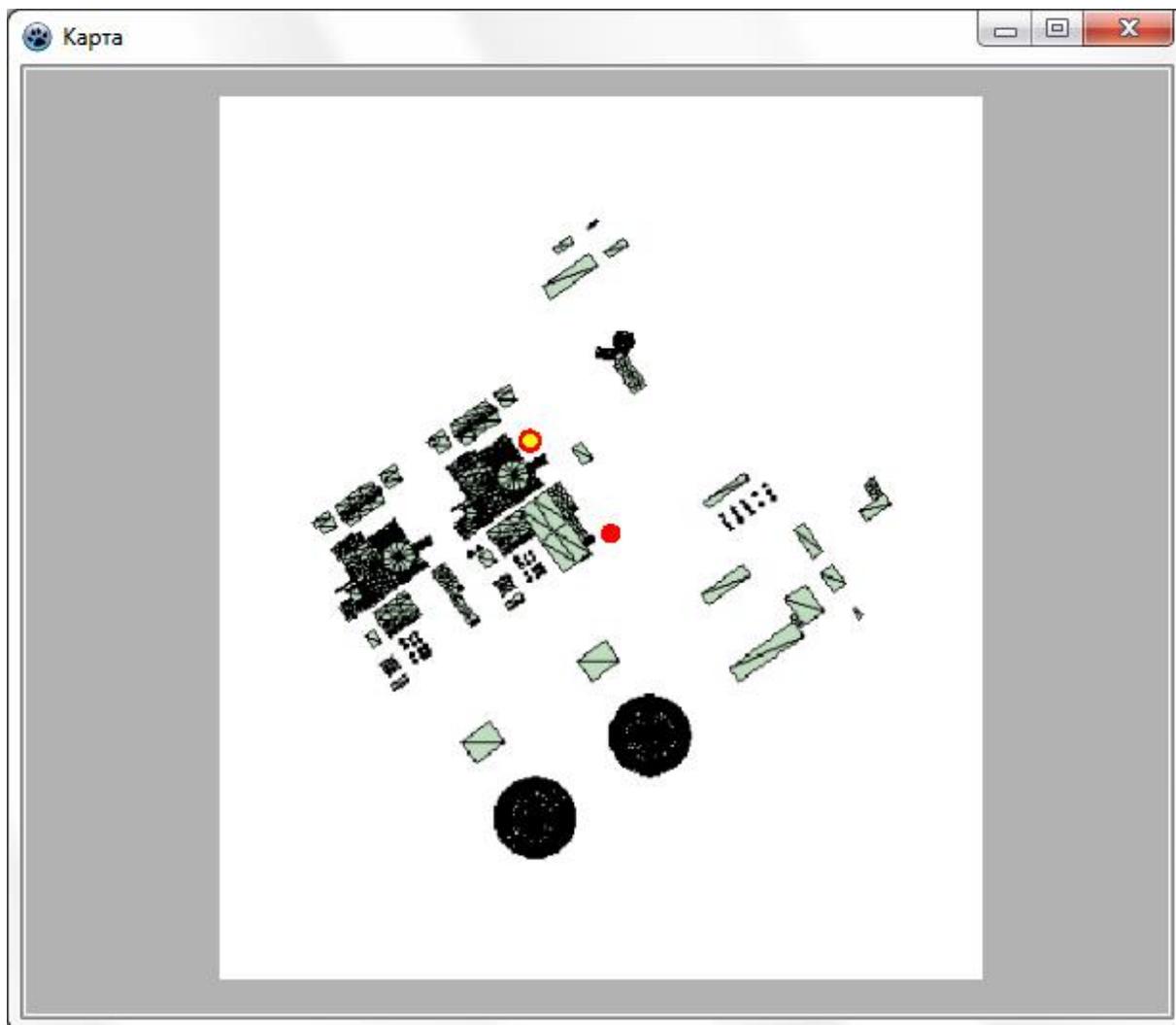


Рисунок 3.91. Окно «Карта»

Окно «Карта» предназначено для отображения ортогональной проекции (вид сверху) расчетной области, текущего положения курсора (красный кружок) и горизонтального положения источника выброса радиоактивных веществ (желтый кружок с красной границей). С помощью «мыши» возможно перетаскивание курсора по горизонтали в пределах расчетной области.

3.8.5. Локальный вид

Для открытия окна «Локальный вид» воспользуйтесь пунктом меню «Вид/Локальный вид» или кнопкой  на панели инструментов главного окна. Окно «Локальный вид» представлено на рисунке 3.92.

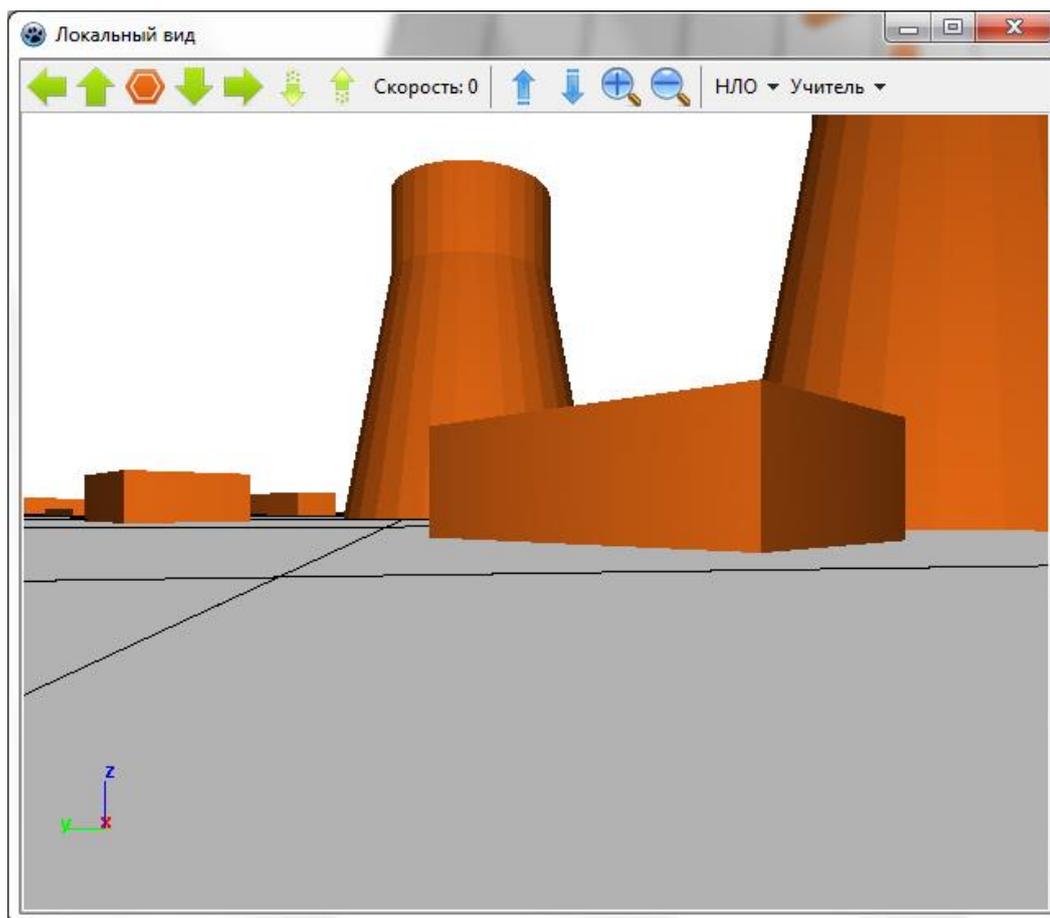


Рисунок 3.92. Окно «Локальный вид»

Окно предназначено для обзора сцены из точки положения курсора, по содержанию объектов дублирует главный вид.

Окно включает в себя следующие элементы:

- Кнопки   [Up/Down] — увеличение/уменьшение скорости движения курсора;
- Кнопки   [Right/Left] — повернуть наблюдателя, передвигающегося вместе с курсором налево/направо;
- Кнопка  [Space] — остановка движения курсора;
- Кнопки   — двигаться вниз/вверх. Изменяет вертикальную скорость движения курсора (в режиме НЛО);
- Поле «Скорость» — отображение значения вертикальной скорости движения курсора в режиме НЛО;
- Кнопки   — посмотреть вверх/вниз. Поворачивает камеру локального вида курсора;
- Кнопки   — приблизить/отдалить камеру. Увеличивает/уменьшает масштаб локального вида расчетной области за счет отдаления камеры обзора;
- Список выбора  — выбор типа курсора из доступных вариантов: Машина, НЛО (на рисунке продемонстрирован выбор НЛО).

3.8.6. Окно отображения поверхностной концентрации аэрозолей

Для открытия окна «Осаждения» воспользуйтесь пунктом меню «Вид/Осаждения» или кнопкой  на панели инструментов главного окна. Вид окна «Осаждения» представлен на рисунке 3.93.

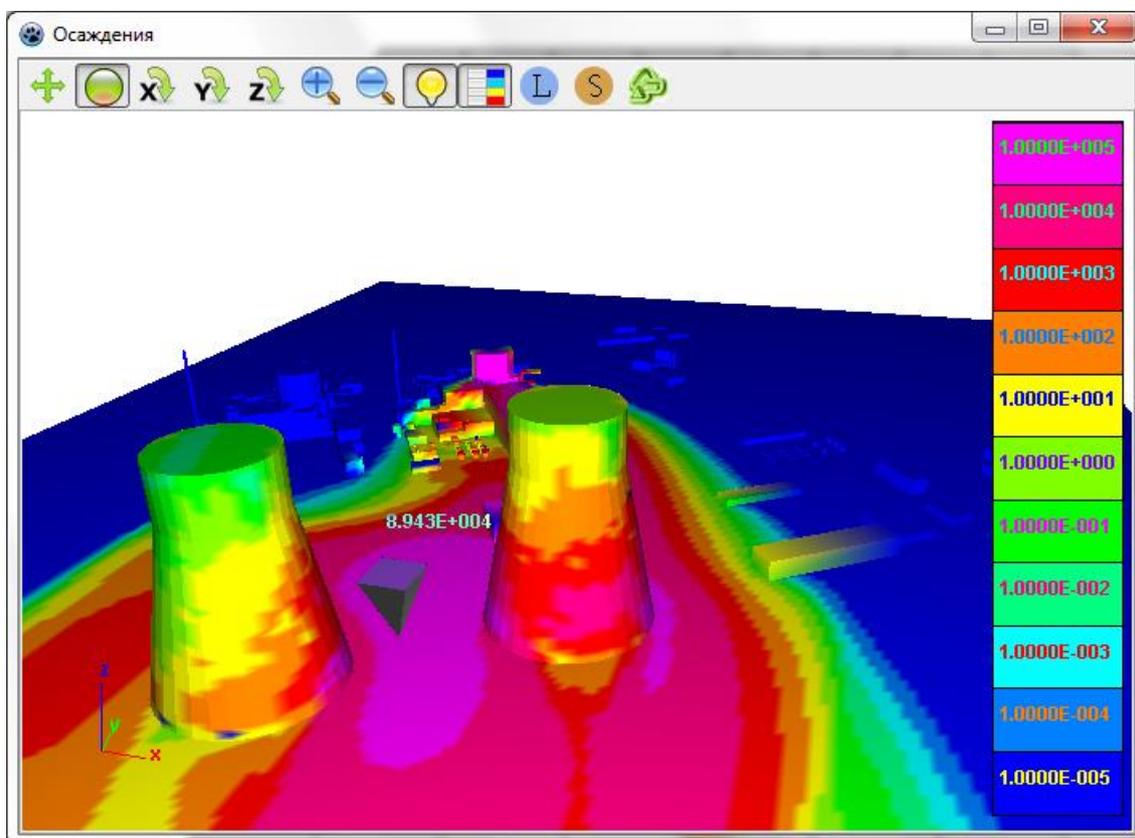


Рисунок 3.93. Окно «Осаждения»

Окно предназначено для визуализации поверхностной концентрации активных аэрозолей на поверхностях объектов сцены, а также на подстилающей поверхности. Над курсором «мыши» выводится поверхностная концентрация в точке поверхности, на которую указывает курсор. Данное окно по содержанию напоминает главное окно, однако между ними есть принципиальные отличия (с точки зрения пользователя). В главном окне поверхности объектов (включая подстилающую поверхность) имеют один и тот же цвет. В данном окне цвет определенной части поверхности какого-либо объекта зависит от поверхностной концентрации активного радионуклида на этой части поверхности. На панели инструментов данного окна присутствуют те же элементы управления камерой, что и в главном окне, плюс некоторые новые возможности.

Окно включает в себя следующие управляющие элементы:

- Кнопка  — переключение курсора «мыши» в режим перемещения камеры путем параллельного переноса;
- Кнопка  — переключение курсора «мыши» в режим свободного поворота;
- Кнопка  — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг горизонтальной оси;
- Кнопка  — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг своей оси;

- Кнопка  — переключение курсора «мыши» в режим вращения камеры вокруг вертикальной оси;
- Кнопка  — перемещение камеры по направлению к точке, на которую она направлена;
- Кнопка  — перемещение камеры по направлению от точки, на которую она направлена;
- Кнопка  — включение/выключение режима освещения поверхности. Во включенном режиме цвет поверхности зависит от ракурса камеры. В выключенном режиме видны ребра треугольников (прямые отрезки черного цвета), составляющих поверхности, но цвет самих треугольников не зависит от ракурса;
- Кнопка  — отображение/скрытие легенды справа;
- Кнопка  — вызов окна редактирования легенды (цветовой палитры и значений уровней);
- Кнопка  — вызов окна расчета (рисунок 3.94) площади поверхности объектов, поверхностная концентрация на которой удовлетворяет заданным границам слева и справа;
- Кнопка  — по нажатию этой кнопки параметрам (положение в пространстве и т. д.) камеры данного окна присваиваются соответствующие параметры камеры главного окна.

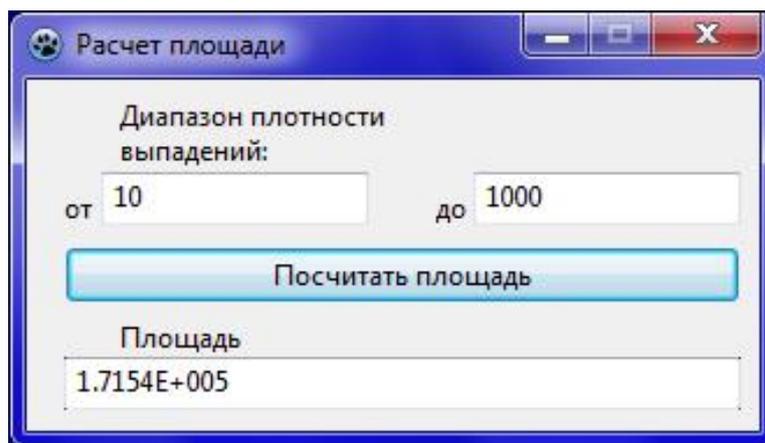


Рисунок 3.94. Окно «Расчет площади»

3.8.7. Окно редактирования легенды

Окно редактирования легенды (его вкладки) показано на рисунках 3.95, 3.96.

Данное окно предназначено для редактирования легенды визуализируемых изоповерхностей, цветных карт, поверхностей осаждения. Под легендой, как и везде, здесь понимается соответствие цветов и значений переменной, поле которой подлежит визуализации.

Окно содержит следующие элементы.

Вкладка градиент:

- Поле ввода «мин» — наименьший уровень. Над полем ввода располагается метка с фактическим минимальным по расчетной области значением величины, для которой был открыт этот диалог;
- Поле ввода «макс» — наибольший уровень. Над полем ввода располагается метка с фактическим максимальным по расчетной области значением;
- Поле ввода «Кол-во элементов» — количество уровней в легенде;

- Флаг «*Степенная шкала*» — индикатор того, будет ли шкала линейной или степенной.
- *Индикатор цветовой гаммы* — выбор цветового спектра;
- *Применить* — расчет и сохранение (в оперативной памяти) уровней с учетом введенных параметров градиентной легенды.

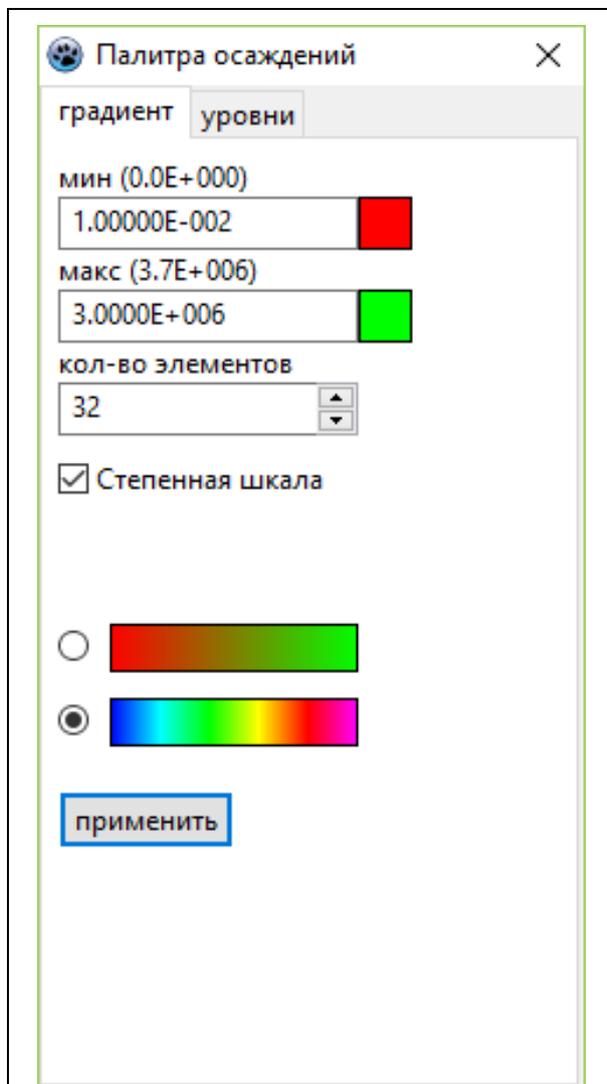


Рисунок 3.95. Вкладка «градиент» окна редактирования цветовой легенды

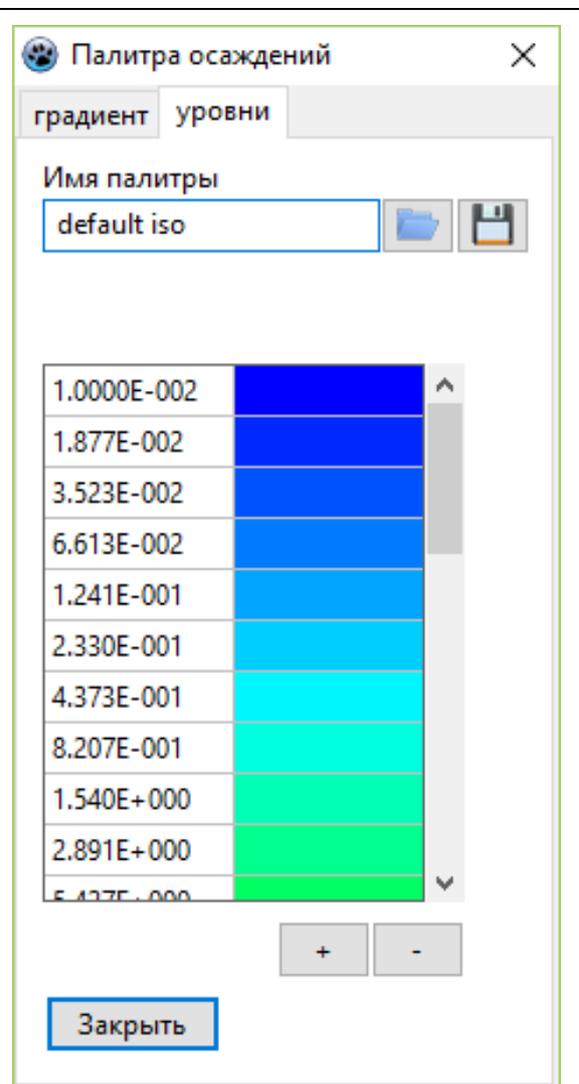


Рисунок 3.96. Вкладка «уровни» окна редактирования цветовой легенды

Вкладка уровни:

- *Имя палитры* — произвольное имя палитры, задаваемое пользователем;
- *Открыть* — загрузить легенду из файла;
- *Сохранить* — сохранить текущую легенду в файл;
- *Таблица значений и цветов* — позволяет редактировать легенду «вручную» причем как значений уровней, так и их цветов;
- «+» — добавить уровень после выделенного;
- «-» — удалить выделенный уровень;
- *Закреть* — закрыть данное окно.

3.8.8. Окно управления курсором

Окно «Управление курсором» автоматически отображается при открытии сценария. Это окно представлено на рисунке 3.97.

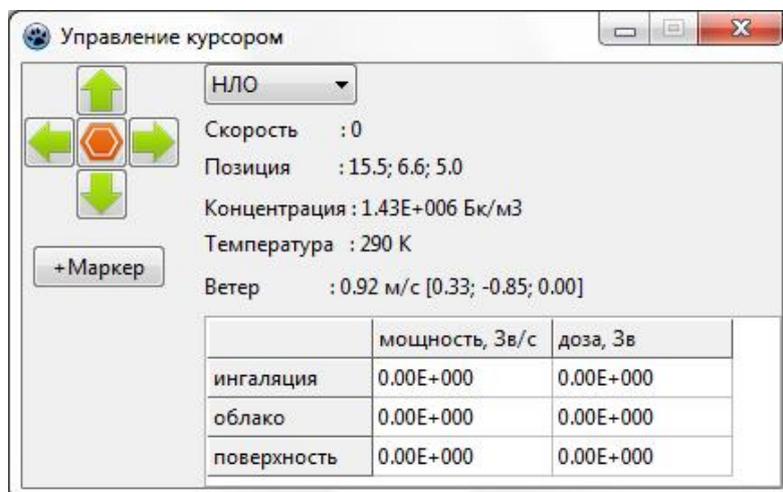


Рисунок 3.97. Окно «Управление курсором»

Окно предназначено для контролирования положения курсора и отображения его текущего состояния, а также состояния среды в точке его нахождения. Оно включает в себя следующие элементы:

- Кнопки [Ctrl+Up/Down] — увеличение/уменьшение скорости движения курсора;
- Кнопки [Ctrl+Right/Left] — поворот курсора налево/направо;
- Кнопка [Ctrl+Space] — остановка курсора;
- Кнопка «+Маркер» [F2] — установка нового маркера в точке текущего положения курсора;
- Выпадающий список — выбор типа курсора из доступных вариантов: *Машина* и *НЛО*. В первом случае курсор может перемещаться только в приповерхностном слое вблизи подстилающей поверхности, а во втором — во всем трехмерном пространстве;
- Поле «Скорость» — отображение текущей скорости курсора;
- Поле «Позиция» — отображение координат курсора, клик по координатам открывает поля для ручного задания позиции курсора;
- Поле «Концентрация» — отображение значения концентрации активного радионуклида (аэрозоля/газа) в точке нахождения курсора;
- Поле «Температура» — отображение значения температуры воздуха в точке нахождения курсора;
- Поле «Ветер» — отображение модуля скорости ветра и значение его компонент в точке нахождения курсора;
- Таблица доз — таблица 2×3, в которой отображаются мощности доз по всем типам облучения в точке нахождения курсора, и интеграл от этих значений по времени (накопленная доза) для этих же типов облучения. Если в текущий момент времени расчет дозы выключен, то мощности не рассчитываются, а в соответствующих ячейках таблицы стоят нули. Если расчет дозы вообще не был включен за сеанс работы со сценарием, то нулевые также и накопленные дозы.

4. ПРАКТИКУМ

В данной главе приведены несколько практических заданий, позволяющих в полной мере освоить возможности ПС РОУЗ.

В первом практическом задании пользователю предлагается самостоятельно создать разработанный авторами макет объекта в *GeometryEditor* и задать сценарий аварии с помощью *EditInp*. После этого провести расчет и изучить основные возможности визуализации результатов расчета с помощью постпроцессора *Simulator*.

Второе практическое задание предназначено для закрепления освоенного материала. Для построенной в первом практическом задании геометрической модели пользователю предлагается задать новый сценарий. После этого провести расчет и повторить аналогичные задания при работе с *Simulator*.

В третьем практическом задании пользователю предлагается поработать с макетом реальной АЭС (Белоярская АЭС). Помимо отработки различных элементов визуализации, добавлены задания на расчет доз.

4.1. Практическое задание № 1

4.1.1. Построение модели объекта в геометрическом редакторе

Задание. Построить в *GeometryEditor* (п. 3.5) подготовленную модель условного объекта, изображенного на рисунке 4.1.

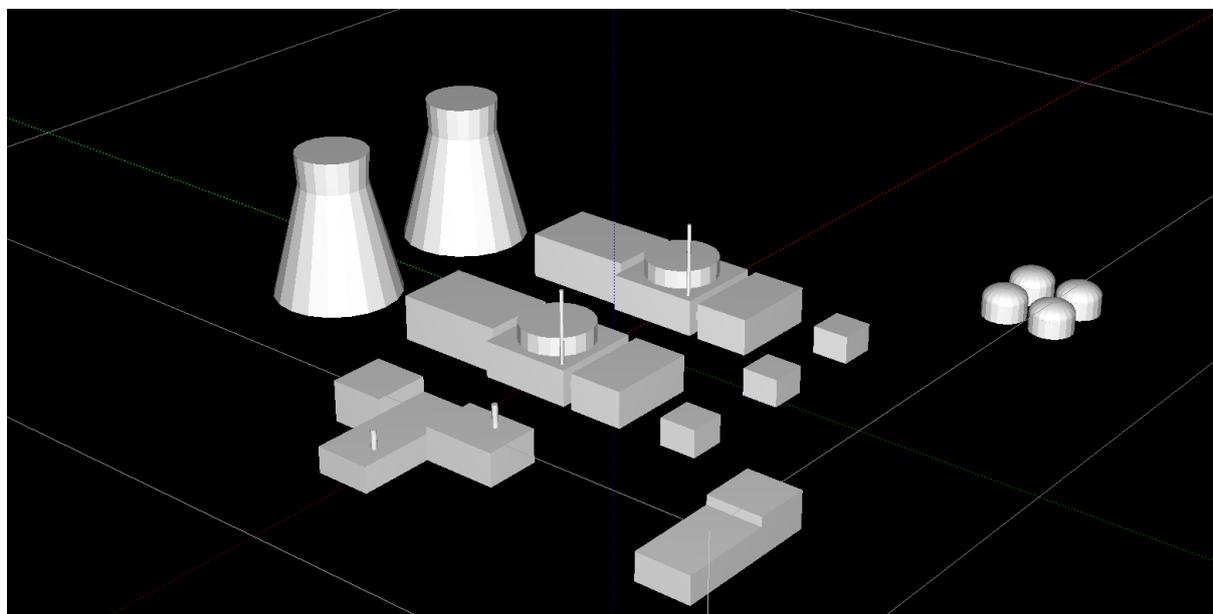


Рисунок 4.1. Геометрическая модель условного объекта

Для начала работы с *GeometryEditor* запускается программная оболочка *ModelFramework* и создается новый файл (п. 3.5.1).

На первом шаге создания сцены (п. 3.5.2) необходимо задать размеры расчетной области и шаг сетки. В панели инструментов (п. 0) меню *GeometryEditor* выбирается диалоговое окно «Сетка и карта». В появившемся окне задаются размеры расчетной области ($-250 \leq x \leq 250$, $-$

$250 \leq y \leq 250$, $0 \leq z \leq 100$) и количество расчетных узлов ($101 \times 101 \times 26$). Сетка выбирается равномерной. При выбранных параметрах шаг сетки равен $5 \times 5 \times 4$ м. (см. рисунок 4.2).

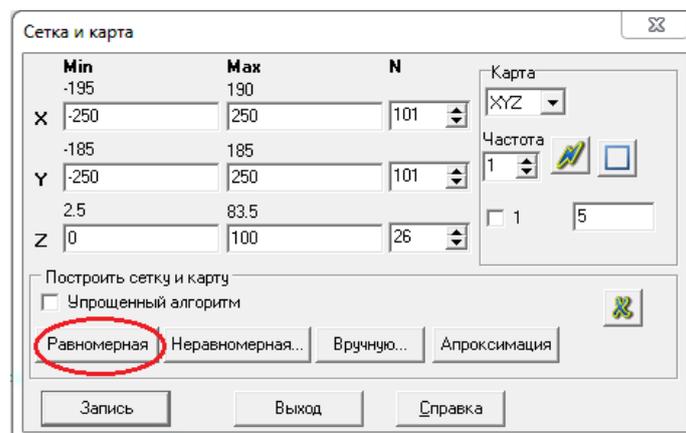


Рисунок 4.2. Задание размеров расчетной области и сетки

Объект состоит из 32 элементов (см. рисунок 4.3), реализуемых с помощью *стандартных форм объектов*, для которых необходимо задать размеры и положение их геометрических центров (п. 3.5.3). Для построения геометрической модели используются 4 *стандартные формы объектов* (п. 0): градирня (1—2), параллелепипед (3—18), цилиндр (19—28) и полуэллипсоид (29—32). При создании, каждый новый *стандартный объект* отображается в дереве объектов (п. 3.5.3). В *диалоге объекта* в режиме *создание/редактирование* (п. 3.5.3) можно изменять его параметры.

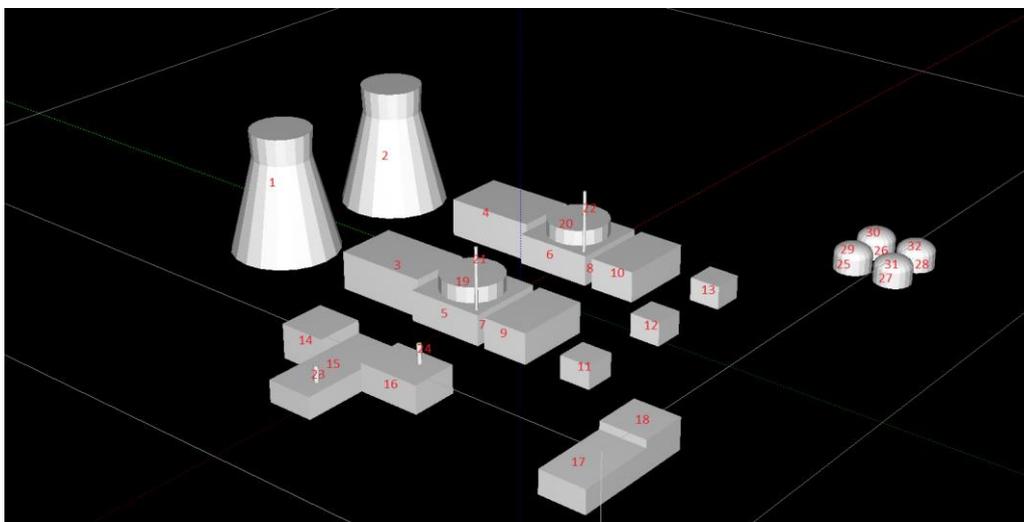


Рисунок 4.3. Элементы комплексного объекта

Параметры объектов следующие:

Объекты типа «градирня»:

1. центр: $X=-50, Y=150, Z=43$;
радиус основания: 35;
радиус шеи: 19;
радиус крыши: 20;
высота н. ч.: 63;
высота в. ч.: 18.

2. центр: $X = 50, Y = 150, Z = 43$;
радиус основания: 35;
радиус шеи: 19;
радиус крыши: 20;
высота н. ч.: 63;
высота в. ч.: 18.

Объекты типа «параллелепипед»:

3. центр: $X=-50, Y=50, Z=15$;
длина: 40;
ширина: 60;
высота: 25.
4. центр: $X = 50, Y = 50, Z = 15$;
длина: 40;
ширина: 60;
высота: 25.
5. центр: $X=-50, Y=-5, Z=12.5$;
длина: 50;
ширина: 50;
высота: 20.
6. центр: $X=50, Y=-5, Z=12.5$;
длина: 50;
ширина: 50;
высота: 20.
7. центр: $X=-50, Y=-32.5, Z=12.5$;
длина: 40;
ширина: 5;
высота: 5.
8. центр: $X=50, Y=-32.5, Z=12.5$;
длина: 40;
ширина: 5;
высота: 5.
9. центр: $X=-50, Y=-50, Z=12.5$;
длина: 50;
ширина: 30;
высота: 20.
10. центр: $X=50, Y=-50, Z=12.5$;
длина: 50;
ширина: 30;
высота: 20.
11. центр: $X=-65, Y=-100, Z=10$;
длина: 20;
ширина: 20;
высота: 15.
12. центр: $X=0, Y=-100, Z=10$;
длина: 20;
ширина: 20;
высота: 15.
13. центр: $X=60, Y=-100, Z = 10$;
длина: 20;
ширина: 20;
высота: 15.

14. центр: $X=-140, Y=-30, Z=13.5$;
длина: 30;
ширина: 30;
высота: 22.
15. центр: $X=-160, Y=0, Z=9.5$;
длина: 70;
ширина: 30;
высота: 14.
16. центр: $X=-140, Y=-35, Z=11.5$;
длина: 30;
ширина: 40;
высота: 18.
17. центр: $X=-150, Y=-170, Z=10$;
длина: 50;
ширина: 30;
высота: 15.
18. центр: $X=-110, Y=-170, Z=12.5$;
длина: 30;
ширина: 30;
высота: 20.

Объекты типа «цилиндр»:

19. центр: $X=-50, Y=-5, Z=27$;
радиус 1: 20;
радиус 2: 20;
высота: 10.
20. центр: $X=50, Y=-5, Z=27$;
радиус 1: 20;
радиус 2: 20;
высота: 10.
21. центр: $X=-70, Y=-25, Z=42.5$;
радиус 1: 1;
радиус 2: 1;
высота: 40.
22. центр: $X=30, Y=-25, Z=42.5$;
радиус 1: 1;
радиус 2: 1;
высота: 40.
23. центр: $X=-180, Y=-6, Z=21$;
радиус 1: 1.5;
радиус 2: 1.5;
высота: 10.
24. центр: $X=-135, Y=-40, Z=26.5$;
радиус 1: 1.5;
радиус 2: 1.5;
высота: 12.
25. центр: $X=150, Y=-142, Z=7.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.

- 26. центр: $X=178, Y=-142, Z=7.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.
- 27. центр: $X=150, Y=-170, Z=7.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.
- 28. центр: $X=178, Y=-170, Z=7.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.

Объекты типа «полу-эллипсоид»:

- 29. центр: $X=150, Y=-142, Z=12.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.
- 30. центр: $X=178, Y=-142, Z=12.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.
- 31. центр: $X=150, Y=-170, Z=12.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.
- 32. центр: $X=178, Y=-170, Z=12.5$;
радиус 1: 12;
радиус 2: 12;
высота: 10.

Сцена данного объекта с картой фиктивных областей (3.5.4) приведена на рисунке 4.4.

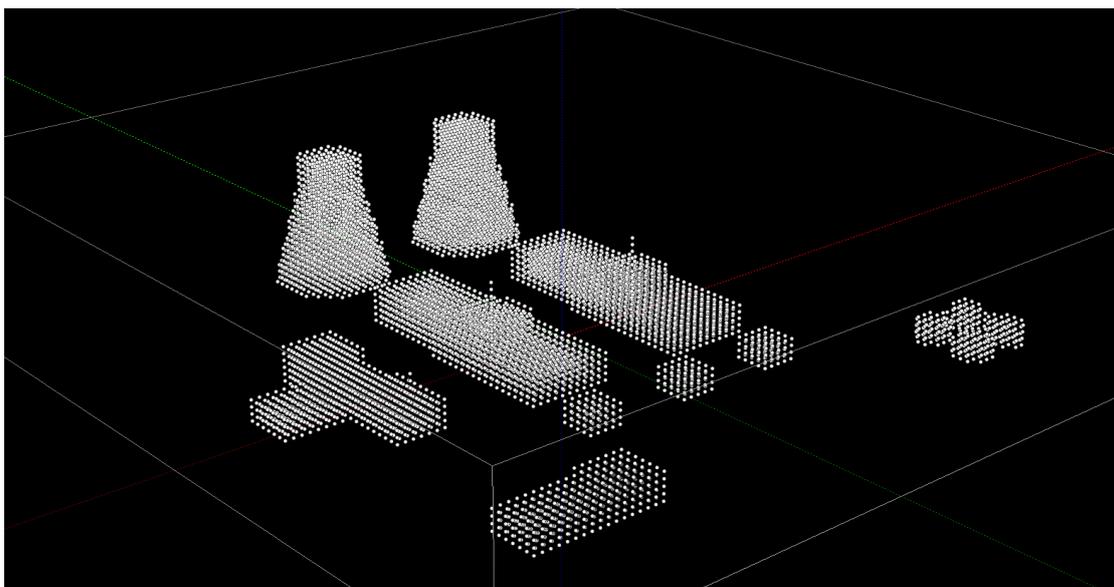


Рисунок 4.4. Сцена объекта с картой фиктивных областей

При выходе из *GeometryEditor* необходимо сохранить изменения.

4.1.2. Создание сценария выброса

После создания в *GeometryEditor* модели объекта в *EditInp* (п. 3.6) необходимо задать сценарий выброса.

Задание. Создать следующий сценарий для рассматриваемого тестового примера:

- время расчета — 400 с;
- частота сброса на запись — 10 с;
- направление ветра— 133 град;
- скорость ветра на высоте 10 м — 4 м/с;
- параметр шероховатости — 0,1 м;
- класс устойчивости атмосферы — «F — Умеренно устойчивая».
- широта, на которой расположен объект — 56;
- сезон — «теплый»;
- координаты источника X=-15, Y=-20, Z=4;
- источник: нуклид — ^{137}Cs , суммарная активность — 10^{10} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0,008 м/с.;
- график затухания источника — источник постоянный в течение 60 с.

Данные параметры задаются в основном и дополнительных окнах *EditInp* (п. 3.6). Основное окно *EditInp* с параметрами представлено на рисунке 4.5. Окна с параметрами источника представлены на рисунках 4.6, 4.7. Координаты источника задаются в окне «Координаты источника».

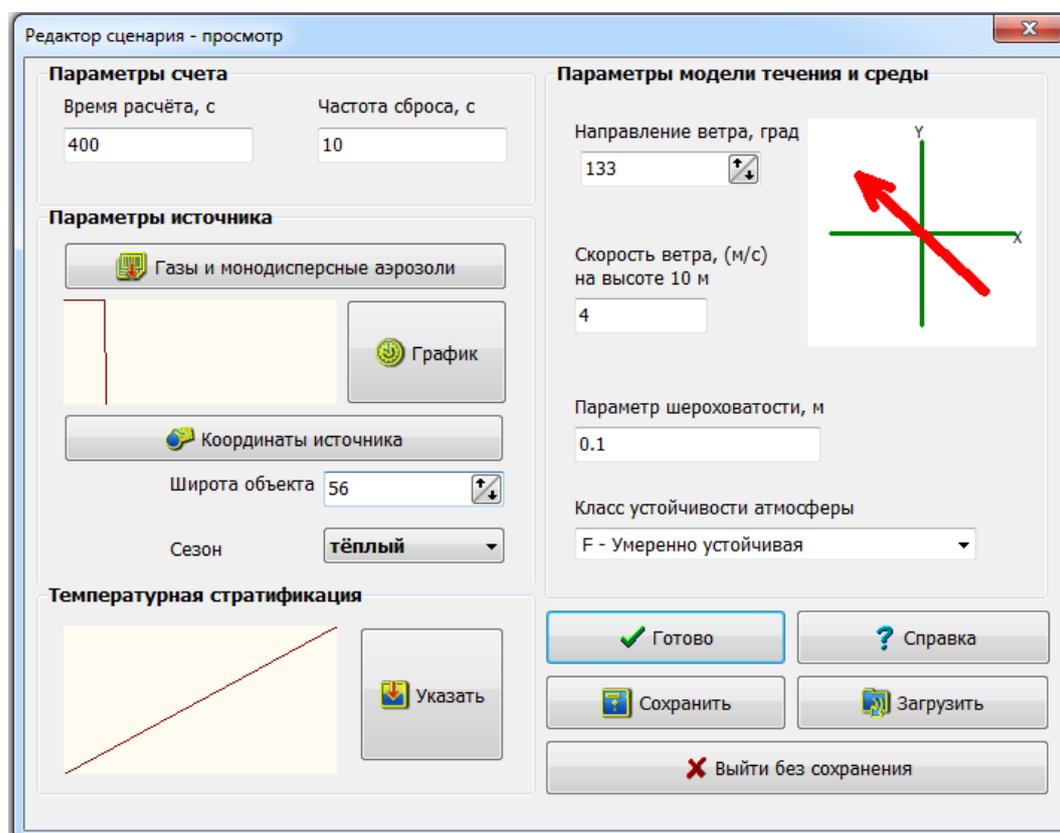


Рисунок 4.5. Параметры в основном окне *EditInp*

Нуклид	Активность, Бк	Скорость осаждения, м/с	
		Гориз.поверхн.	Верт.поверхн.
Cs137	1e+10	0.008	0.008
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0
	0	0	0

Рисунок 4.6. Параметры в окне «Газы и монодисперсные аэрозоли»

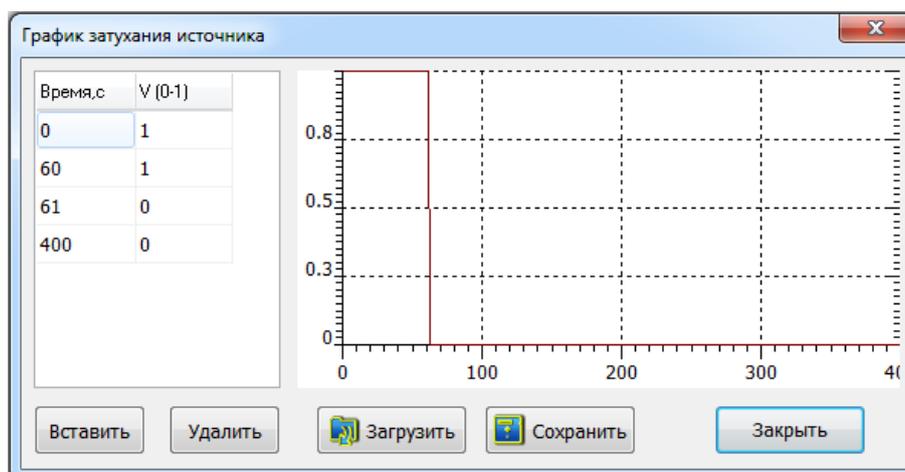


Рисунок 4.7. Параметры в окне «График затухания источника»

После заполнения всех параметров сценария необходимо нажать кнопку «Готово» в основном окне *EditInp*. Далее, при выборе созданного сценария в основном окне программной оболочки *ModelFramework*, после нажатия кнопки «Запуск» производится запуск созданного сценария. После окончания расчета можно просмотреть результаты в *Simulator* ПК РОУЗ, нажав кнопку «Визуализация» в основном окне программной оболочки.

4.1.3. Работа с симулятором

Наиболее полно возможности постпроцессора *Simulator* описаны в руководстве пользователя. В данном практическом задании пользователю предлагается рассмотреть основные настройки *Simulator* и возможности при визуализации результатов расчета на тестовом примере.

Управлением курсором

Окно «Управление курсором» появляется сразу при запуске *Simulator*. В данном окне можно выбрать вид курсора — «Машина» или «НЛО». В редактируемом поле «Позиция» можно задавать положение курсора. Значения в поле «Концентрация», «Температура» и «Ветер» отражают значения соответствующих величин в заданной точке. Изменять текущее положения курсора в плоскости XY также можно с помощью «мышки» при выборе «Карта» в меню главного окна. При выборе данного элемента открывается вспомогательное окно «Карта», где пользователь может «мышкой» изменять текущее положение курсора. При этом все изменения автоматически происходят в окне «Управление курсором». Цвет и размер курсора меняется в меню главного окна «Настройки» → «Прочее». На рисунке 4.8 изображены различные элементы главного окна для управления курсором.

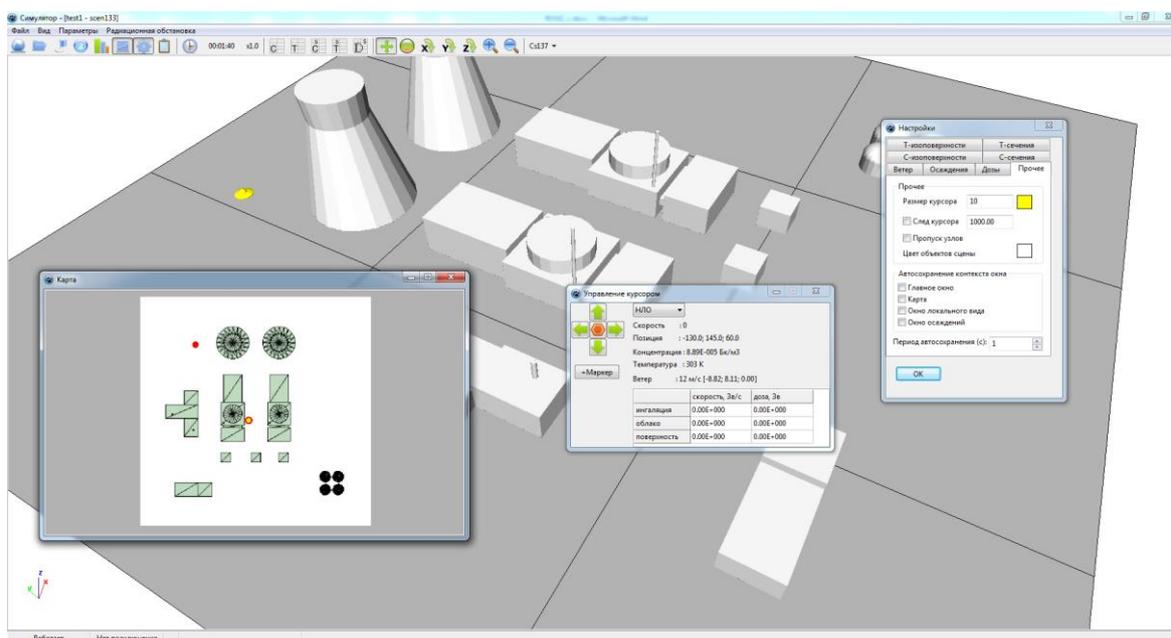


Рисунок 4.8. Элементы главного окна для управления курсором

Выбирать определенный момент времени можно с помощью элемента главного меню «Ход времени».

Задание. Определить значения мгновенной концентрации, температуры и скорости ветра на момент времени 100 с в точках с координатами: (−35; 95; 40), (−10; 40; 20) и (−130; 145; 60).

Ответ. Значения соответствующих величин в первой точке: $1,61 \times 10^2$ Бк/м³, 301 К, 7,44 м/с; во второй точке: $6,8 \times 10^2$ Бк/м³, 301 К, 1,24 м/с; в третьей точке: $8,89 \times 10^5$ Бк/м³, 303 К, 12 м/с.

Построение поля скорости ветра

Для построения поля скорости ветра необходимо в меню главного окна выбрать «Настройки» → «Ветер». Далее, в настройках «Плоскость» выбрать сечение, в котором будет отображаться проекция поля скорости. В качестве примера рассмотрим плоскость $Z = 8$ (рисунок 4.8). Для этого в качестве параметра «Плоскость» нужно выбрать — «Z», а в настройках «Позиция» поставить — «4». Остальные параметры во вкладке «Ветер» представлены для настройки визуализации векторов скорости. Параметр «Режим» позволяет менять цветовую палитру векторов в зависимости от величины скорости ветра или направления. Параметр «Период» позволяет изменять скважность стрелок, а параметры «Размер» и «Толщина линии» длину и толщину стрелки соответственно.

Цвет зданий настраивается в «Настройки» → «Прочее» → «Цвет объектов сцены».

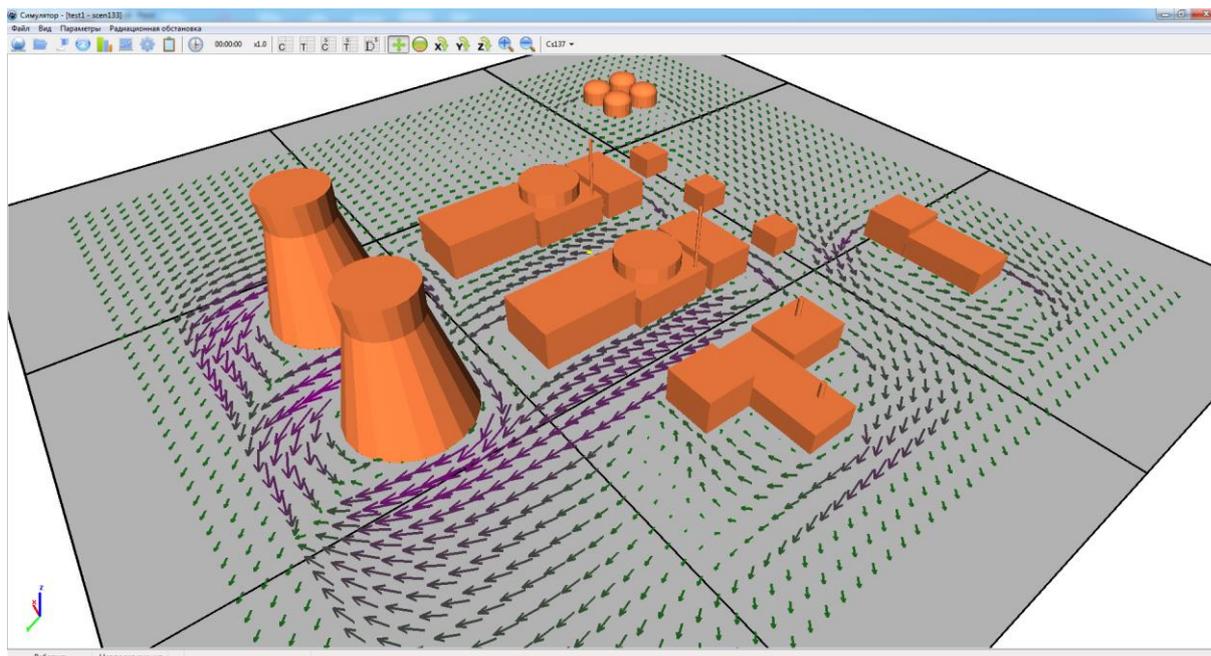


Рисунок 4.8. Поле скорости ветра в плоскости $Z=4$

Узнать значение скорости ветра в определенной точке можно с помощью окна «Управление курсором» (см. выше).

Задание. Построить проекцию поля скорости ветра на плоскости $X=-45$, $Y=-30$, $Z=8$. Ознакомиться с настройками визуализации векторов скорости.

Визуализация значений мгновенной концентрации радионуклида

В меню главного окна имеется возможность выбора изотопа («Выбор изотопа»). В расчете участвует только изотоп ^{137}Cs , поэтому данный изотоп выбирается по умолчанию. Для построения изоповерхностей мгновенной концентрации радионуклида нужно выбрать «Настройки» → «С-изоповерхности». В настройках «Способ отрисовки» выбирается способ отображения изоповерхностей. На рисунке 4.9 приведен пример «Способ отрисовки» → «Прозрачный вырез». В меню главного окна имеется возможность включения/выключения легенды изоповерхностей — «Легенда С-Изоповерхностей». Настройка легенды для изоповерхностей производится в «Настройки» → «С-изоповерхности» → «Палитра».

Значение мгновенной концентрации можно отражать и в различных сечениях — «Настройки» → «С-сечения». В меню главного окна также имеется возможность включения/выключения легенды С-сечений — «Легенда С-Сечений». Настройка легенды для сечений производится в «Настройки» → «С-сечения» → «Палитра».

Выбирать определенный момент времени или проигрывать анимации можно с помощью элемента главного меню «Ход времени».

Задание 1. Построить *изоповерхности* мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с. Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней в интервале от 10^{-3} до $2,6 \times 10^5$ Бк/м³. Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (*элементов*) оставить без изменений (32).

Ответ. Вид облака при данных настройках легенды изображен на рисунке 4.9.

Задание 2. Запустить анимацию распространения облака концентрации радионуклида на различные моменты времени с помощью элемента главного меню «Ход времени».

Задание 3. Отобразить значения мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с в сечениях: $X=-100$, $Y=100$, $Z=20$. Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней

в интервале от 10^{-3} до $2,6 \times 10^5$ Бк/м³. Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (элементов) оставить без изменений (32).

Ответ. Вид данных сечений изображен на рисунке 4.10.

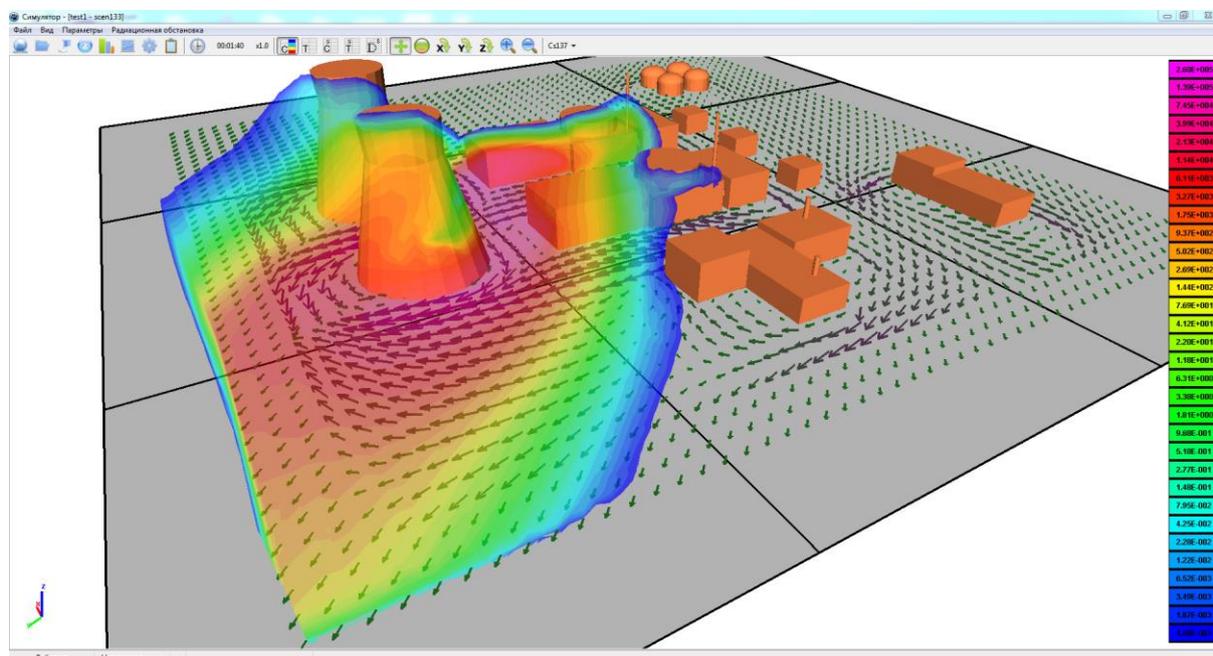


Рисунок 4.9. Изоповерхности мгновенной концентрации ¹³⁷Cs на момент времени 100 с

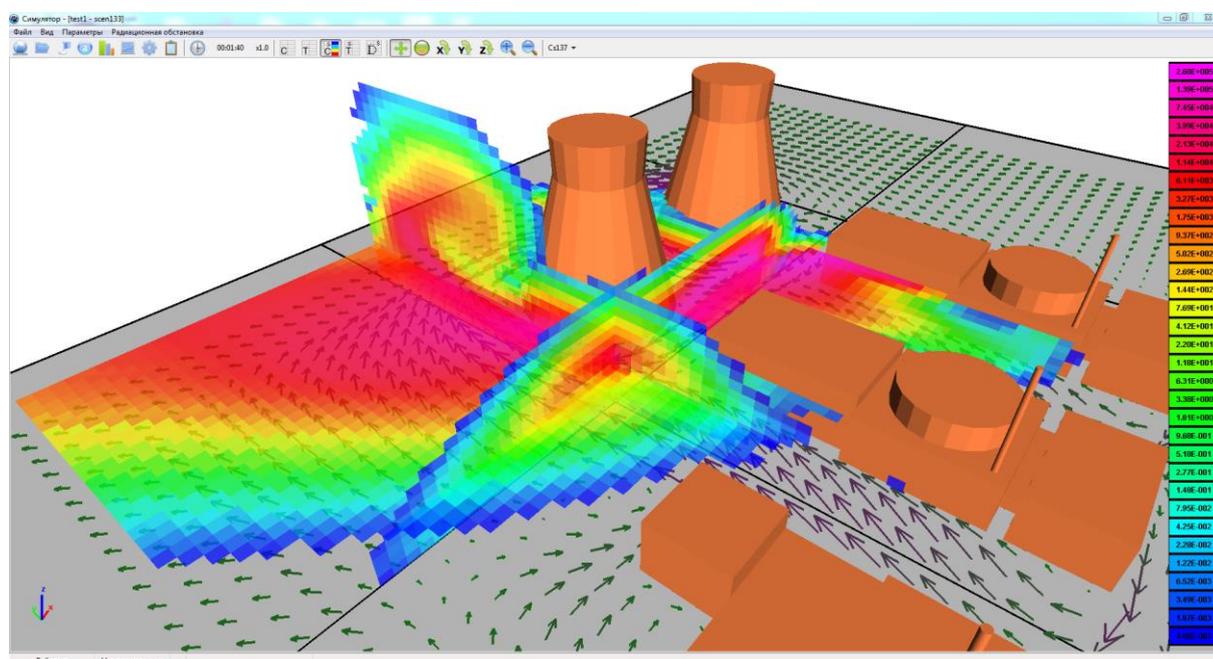


Рисунок 4.10. Вид сечений поля мгновенной концентрации ¹³⁷Cs на момент времени 100 с

Визуализация осадений

При выборе в меню главного окна «*Окно осадений*» откроется дополнительное окно с отображением осадений радионуклида (Бк/м²) на поверхность элементов застройки. Значение поверхностной концентрации радионуклида отображается на текущий момент времени, который также задается в меню главного окна в «*Ход времени*». Настроить легенду осадений можно через

основные настройки в меню главного окна — «Настройки» → «Осаждения» → «Палитра» или в меню окна осаждений «Окно осаждений» → «Настройка легенды». Включение/отключение легенды производится в меню окна осаждений – «Окно осаждений» → «Легенда»

Задание. Построить осаждения ^{137}Cs на поверхности элементов застройки на конец расчетного времени (400 с). Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней в интервале от 10^{-3} до $1,4 \times 10^5$ Бк/м². Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (элементов) оставить без изменений (32).

Ответ. Вид осаждений при данных настройках легенды изображен на рисунке 4.11.

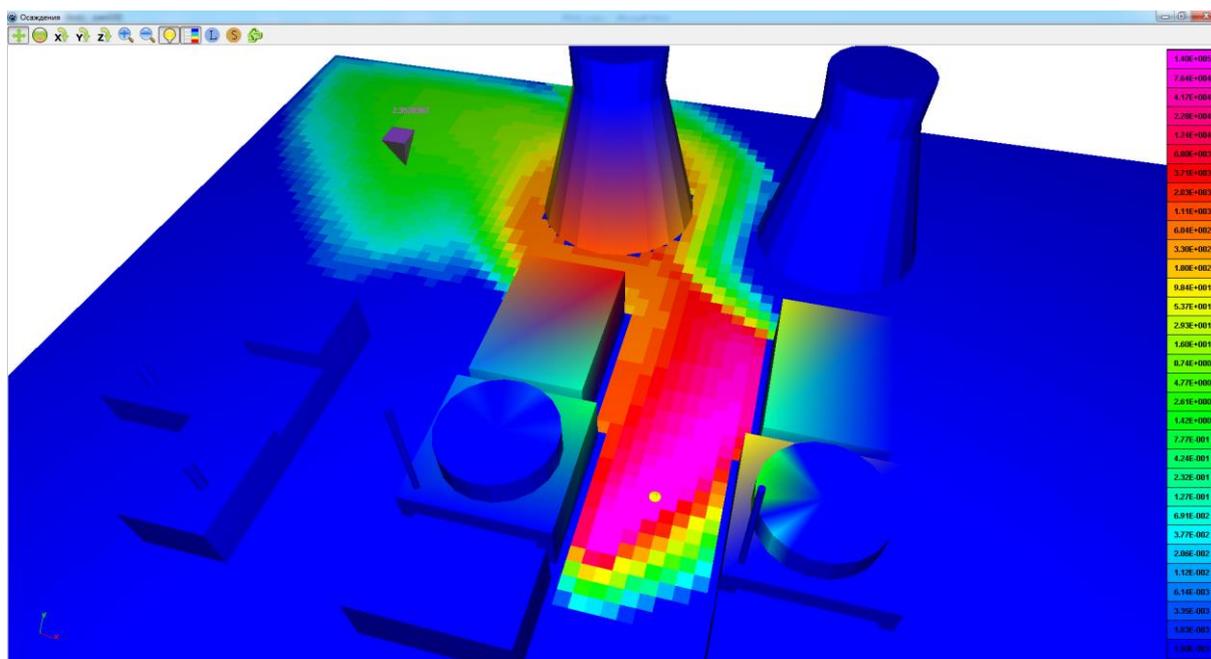


Рисунок 4.11. Вид осаждений ^{137}Cs на момент времени 400 с

4.2. Практическое задание № 2

На тестовой модели объекта из практического задания № 1 пользователю предлагается задать новый сценарий и отработать приобретенные навыки работы с *EditInp* и *Simulator*.

4.2.1. Создание сценария выброса

Задание. Создать следующий сценарий для рассматриваемого тестового примера:

- время расчета — 400 с;
- частота сброса на запись — 10 с;
- направление ветра—269 град;
- скорость ветра на высоте 10м — 4 м/с;
- параметр шероховатости — 0,1 м;
- класс устойчивости атмосферы — «F — Умеренно устойчивая»;
- широта, на которой расположен объект — 56;
- сезон — «теплый»;
- координаты источника X=-15, Y=-20, Z=4;

- источник: нуклид — ^{137}Cs , суммарная активность — 10^{10} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — $0,008$ м/с.;
- график затухания источника — источник постоянный в течении 60 с.

Сценарий в данном практическом задании отличается от предыдущего только направлением ветра при постановке граничных условий.

4.2.2. Работа с симулятором

Управлением курсором

Задание. Определить значения мгновенной концентрации, температуры и скорости ветра на момент времени 100 с. в точках с координатами: (150; 20; 4), (10; 10; 20) и (90; 110; 40).

Ответ. Значения соответствующих величин в первой точке: $3,45 \times 10^3$ Бк/м³, 301 К, 4,01 м/с; во второй точке: $9,08 \times 10^4$ Бк/м³, 301 К, 0,57 м/с; в третьей точке: $1,12 \times 10^{-5}$ Бк/м³, 302 К, 9,09 м/с.

Построение поля скорости ветра.

Задание. Построить проекцию поля скорости ветра на плоскости $X = 60$, $Y = 10$, $Z = 4$. Выбрать оптимальные настройки для визуализации векторов в указанных сечениях.

Ответ. В сечении $Z = 4$ проекция поля скорости ветра имеет вид, изображенный на рисунке 4.12. Настройки: *Период* — «2», *Размер* — «3», *Толщина линии* — «3».

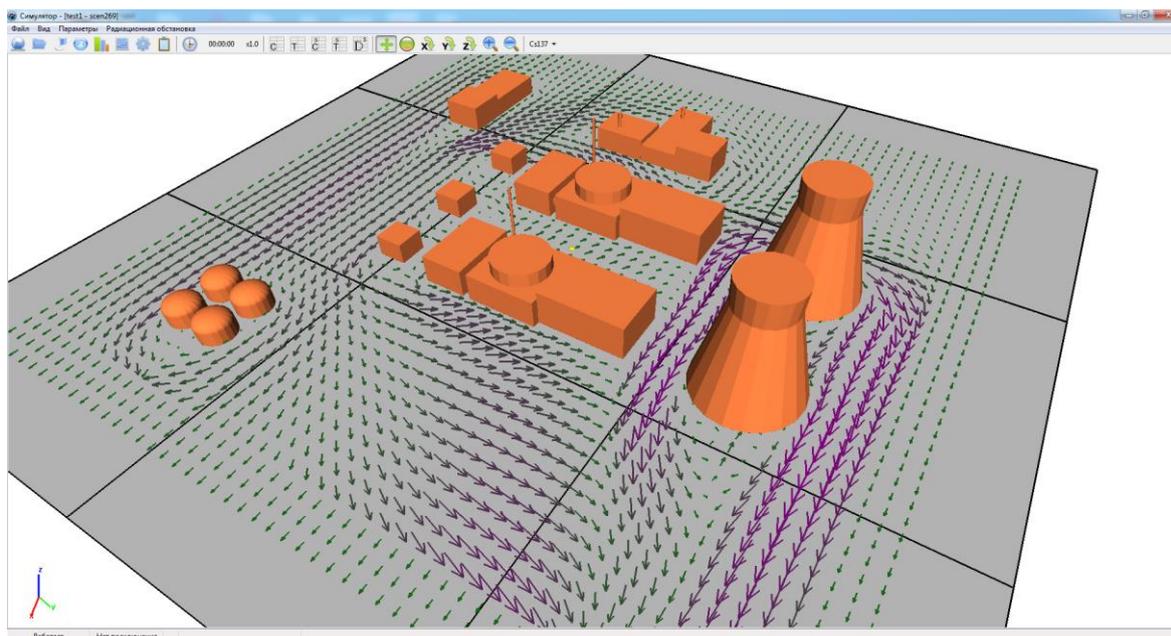


Рисунок 4.12. Поле скорости ветра в плоскости $Z=4$

Визуализация значений мгновенной концентрации радионуклида.

Задание 1. Построить *изоповерхности* мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с. Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней в интервале от 10^{-3} до $6,5 \times 10^5$ Бк/м³. Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (*элементов*) оставить без изменений («32»).

Ответ. Вид облака при данных настройках легенды изображен на рисунке 4.13.

Задание 2. Запустить анимацию распространения облака концентрации радионуклида на различные моменты времени с помощью элемента главного меню «Ход времени».

Задание 3. Отобразить значения мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с в сечениях: $X = 150, Y = 10, Z = 4$. Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней в интервале от 10^{-3} до $6,5 \times 10^5$ Бк/м³. Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (элементов) оставить без изменений (32).

Ответ. Вид данных сечений изображен на рисунке 4.14.

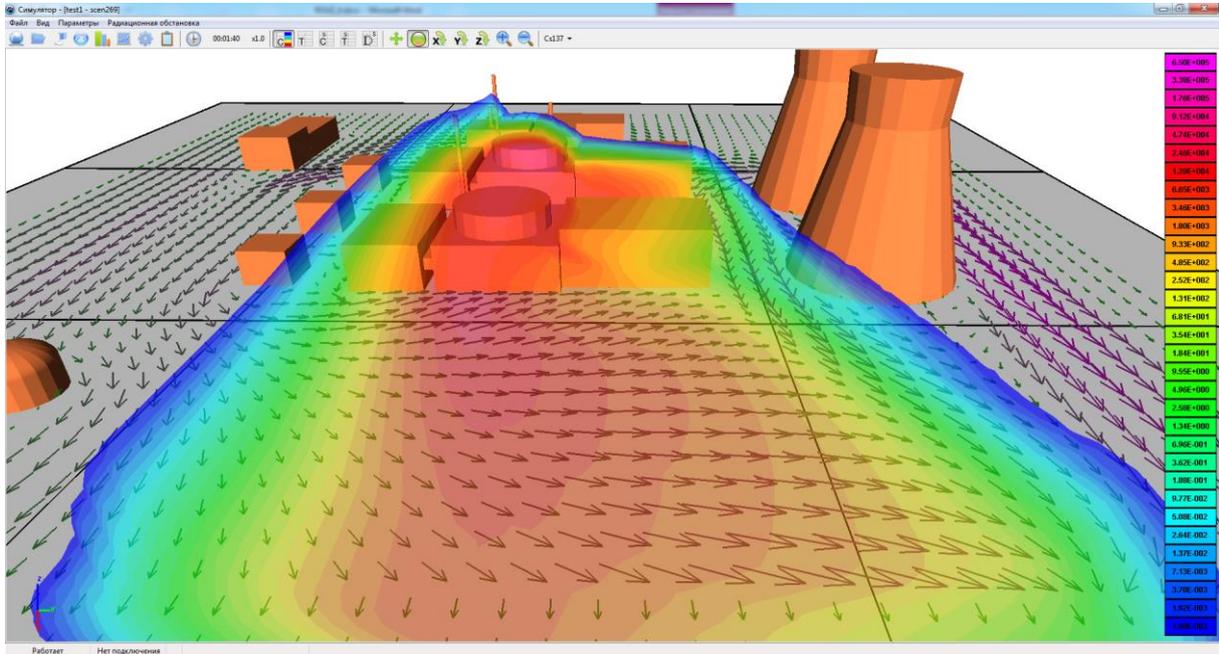


Рисунок 4.13. Изоповерхности мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с

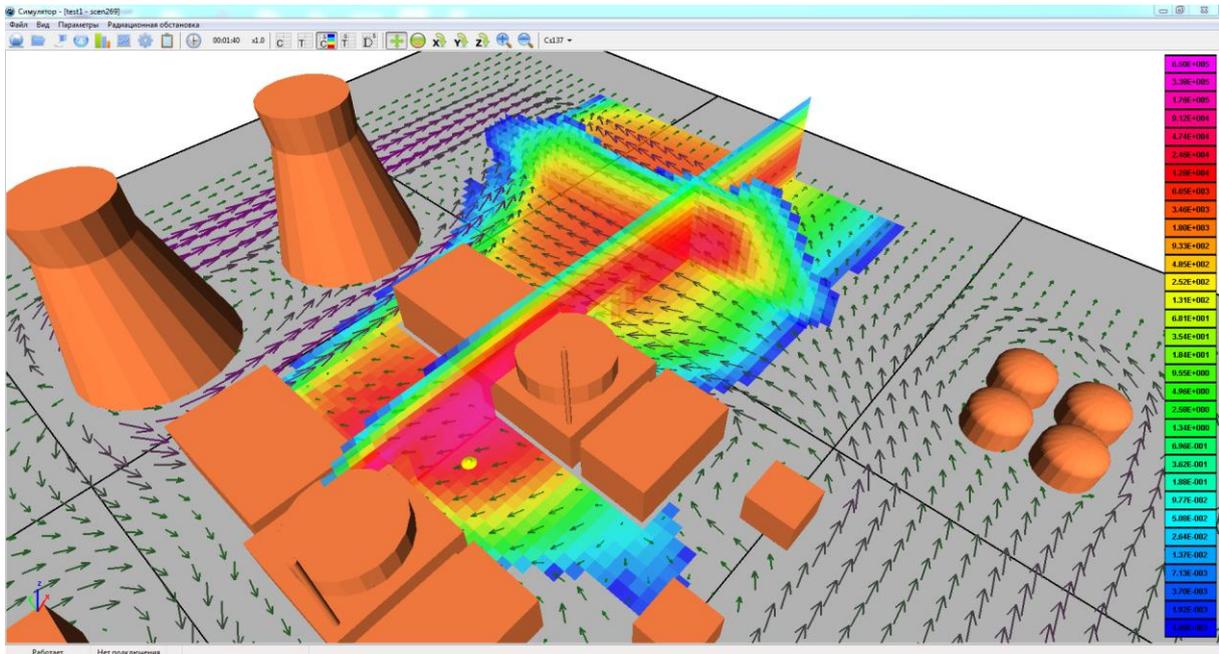


Рисунок 4.14. Вид сечений поля мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 100 с

Визуализация осадений.

Задание. Построить осадения ^{137}Cs на поверхности элементов застройки на конец расчетного времени (400 с). Добавить легенду со степенной шкалой и значениями уровней в интервале от 10^{-3} до $1,8 \times 10^6$ Бк/м². Выбрать второй тип палитры. Количество уровней (элементов) оставить без изменений (32).

Ответ. Вид осадений при данных настройках легенды изображен на рисунке 4.15.

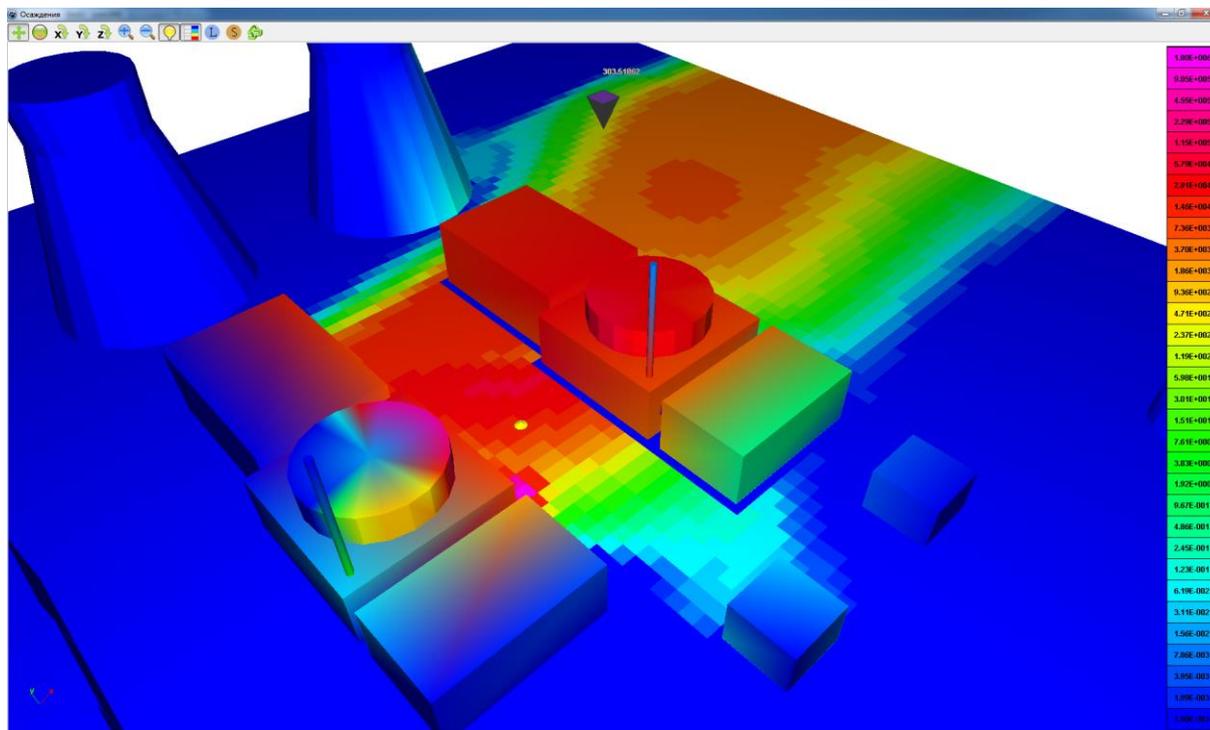


Рисунок 4.15. Вид осадений ^{137}Cs на момент времени 400 с

4.3. Практическое задание № 3

Пользователю предлагается поработать с макетом реальной АЭС. Модель объекта Белоярской АЭС и данные расчета по двум сценариям входят в пакет поставки учебного пособия. Расчетная сцена представляет собой область размером (x, y, z) $800 \times 800 \times 200$ м с геометрической моделью объекта в формате STL (рисунок 4.16). Сетка равномерная с количеством расчетных узлов $161 \times 161 \times 41$ (шаг сетки 5 м). В обоих случаях тип сценария — условная авария «Потеря системного и надежного электроснабжения (отказ активных систем остановки реактора, отказ САОТ)». Помимо отработки элементов визуализации добавлены упражнения на расчет доз.

4.3.1. Сценарий 1

Параметры сценария:

- время расчета — 600 с;
- частота сброса на запись — 10 с;
- направление ветра — 23 град;
- скорость ветра на высоте 10м — 3 м/с;
- параметр шероховатости — 0,1 м;
- класс устойчивости атмосферы — «G — Сильно устойчивая»;

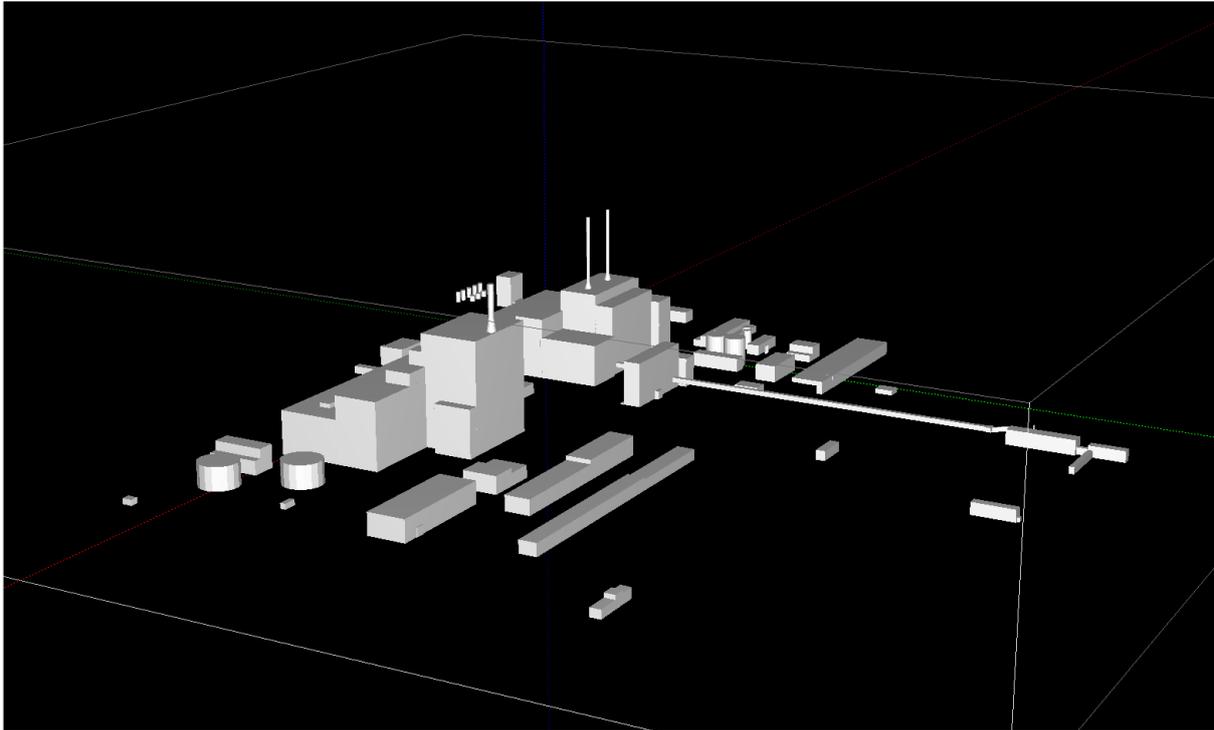


Рисунок 4.16. Сцена с макетом Белоярской АЭС

- температурная стратификация имеет линейный профиль (вблизи поверхности — 300 К, на высоте 100 м — 306,3 К);
- широта, на которой расположен объект — 57;
- сезон — «теплый»;
- координаты источника $X = 260$, $Y = 130$, $Z = 10$;
- источник:
 - ^{137}Cs , суммарная активность — 5×10^{13} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0,008 м/с,
 - ^{133}Xe , суммарная активность — $9,5 \times 10^{14}$ Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0 м/с,
 - ^{135}Xe , суммарная активность — 7×10^{11} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0 м/с;
- график затухания источника — источник постоянный в течение 20 с.

Работа с симулятором. Упражнения на повторение

Задание 1. Построить проекцию поля скорости ветра на плоскость $Z=5$. Добавить изоповерхности мгновенной концентрации для одного из элементов на момент времени 60 с. Настроить легенду.

Ответ. Проекция поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$ и изоповерхности мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 60 с изображены на рисунке 4.17.

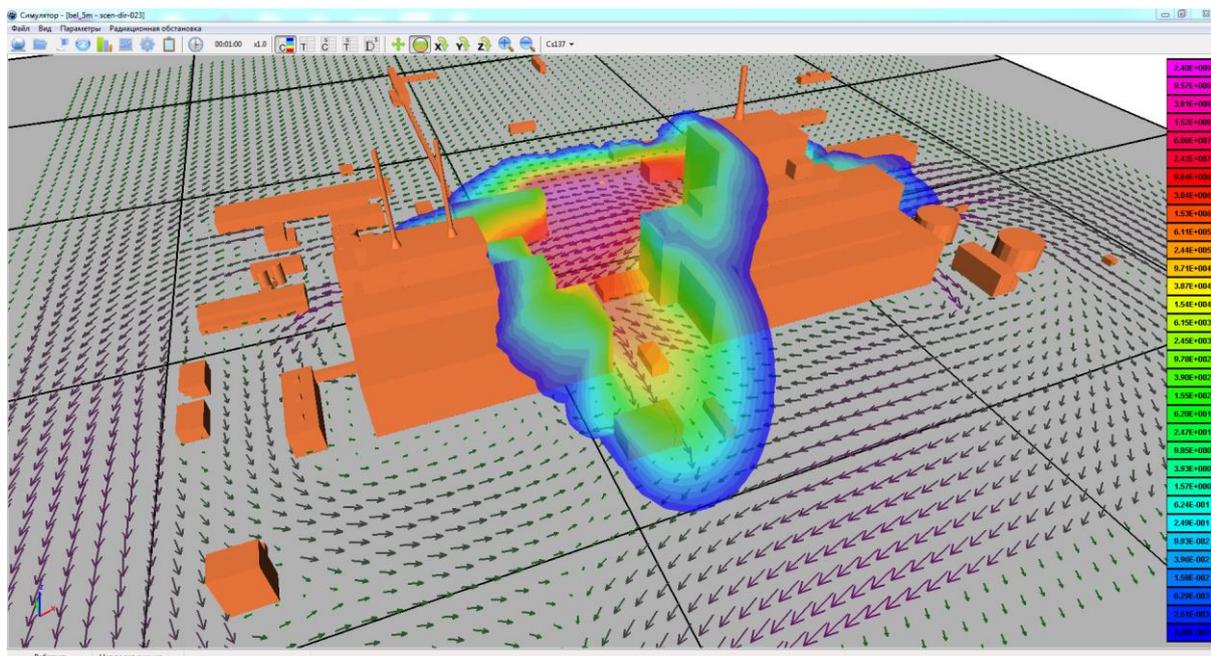


Рисунок 4.17. Вид проекции поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$ и изоповерхностей мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 60 с

Задание 2. Построить осаднения ^{137}Cs на поверхности элементов застройки на конец расчетного времени (600 с). Настроить легенду.

Ответ. Вид осаднений изображен на рисунке 4.18.

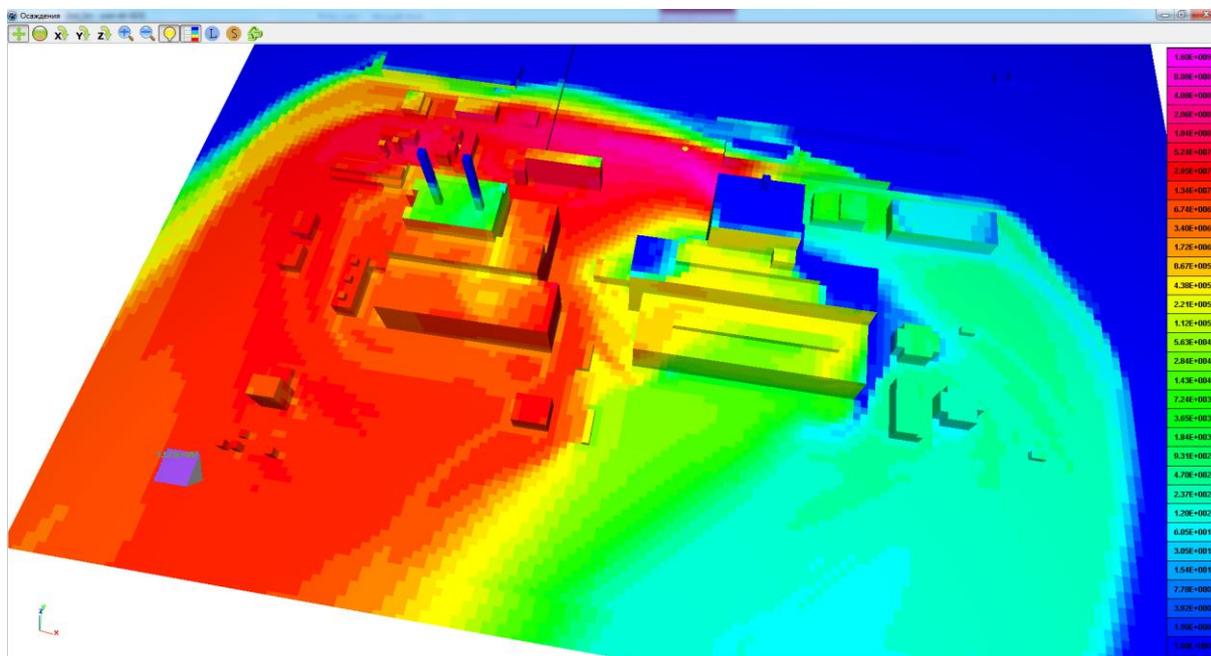


Рисунок 4.18. Вид осаднений ^{137}Cs на момент времени 600 с

Работа с симулятором. Расчет доз

Расчет доз (п. 3.8.2) производится в меню главного окна при выборе элемента «Радиационная обстановка» (п. 3.8.3.). В окне «Радиационная обстановка» пользователь может выбрать тип измеряемой функции: «скорость набора дозы» или «интегральная доза». В поле «Пути облучения» выбираются пути облучения: от ингаляции, облака и/или поверхности (можно выбрать один или несколько путей облучения). Мощность доз/дозы рассчитываются от всех нуклидов. Для удобства имеется возможность выбора единиц измерения для рассчитываемых функций в поле «единицы измерения». Расчет производится при нажатии в поле «Рассчитать на момент ... сек». **Важно:** перед нажатием «Рассчитать на момент ... сек» необходимо с помощью элемента «Ход времени» в меню главного окна выбрать соответствующий момент времени. Для того чтобы мощность доз/дозы от выбранных путей облучения отобразились в главном окне, нужно в окне «Радиационная обстановка» поставить галочку в поле «Показать». После этого можно настроить легенду в поле «Настроить палитру». Для того, чтобы изменить путь облучения и заново рассчитать соответствующие дозы, необходимо сначала очистить предыдущие расчеты нажатием в поле «Очистить». После этого процедуру выбора пути облучения и расчета доз можно повторить заново.

Задание 1. Рассчитать скорость набора дозы от ингаляции, облака и поверхности по отдельности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-2} мкЗв/час.

Ответ. Скорость набора дозы от соответствующих путей облучения на момент времени 30 с изображены на рисунках 4.19—4.21.

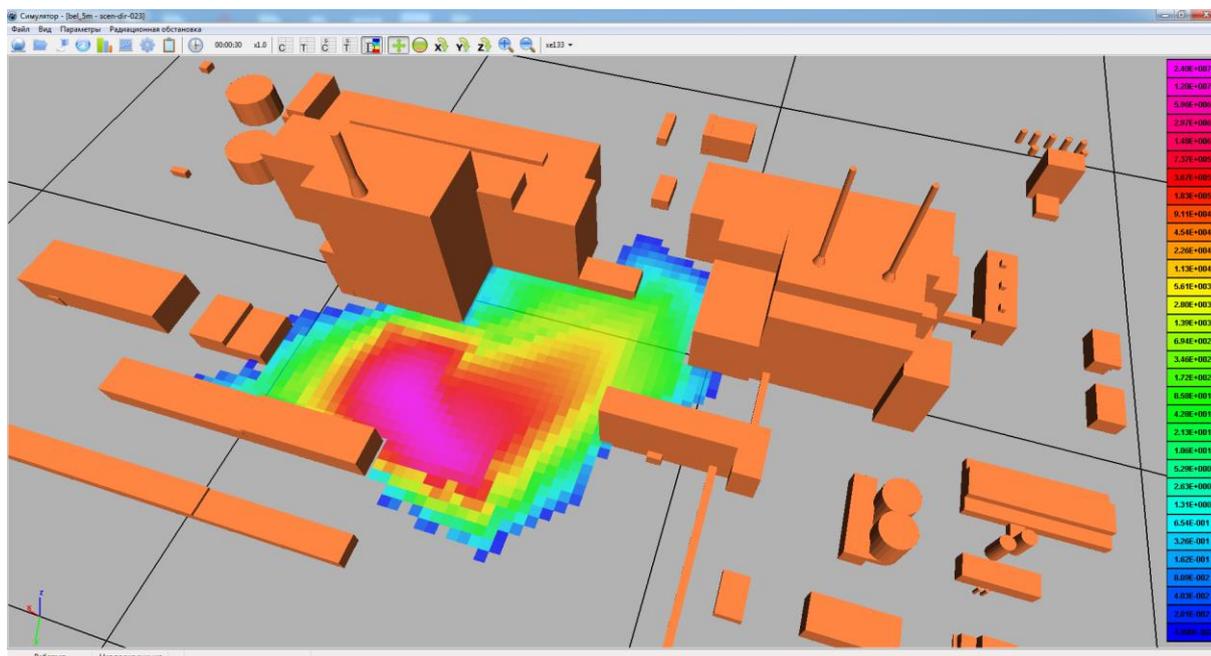


Рисунок 4.19. Скорость набора дозы от ингаляции на момент времени 30 с, мкЗв/час

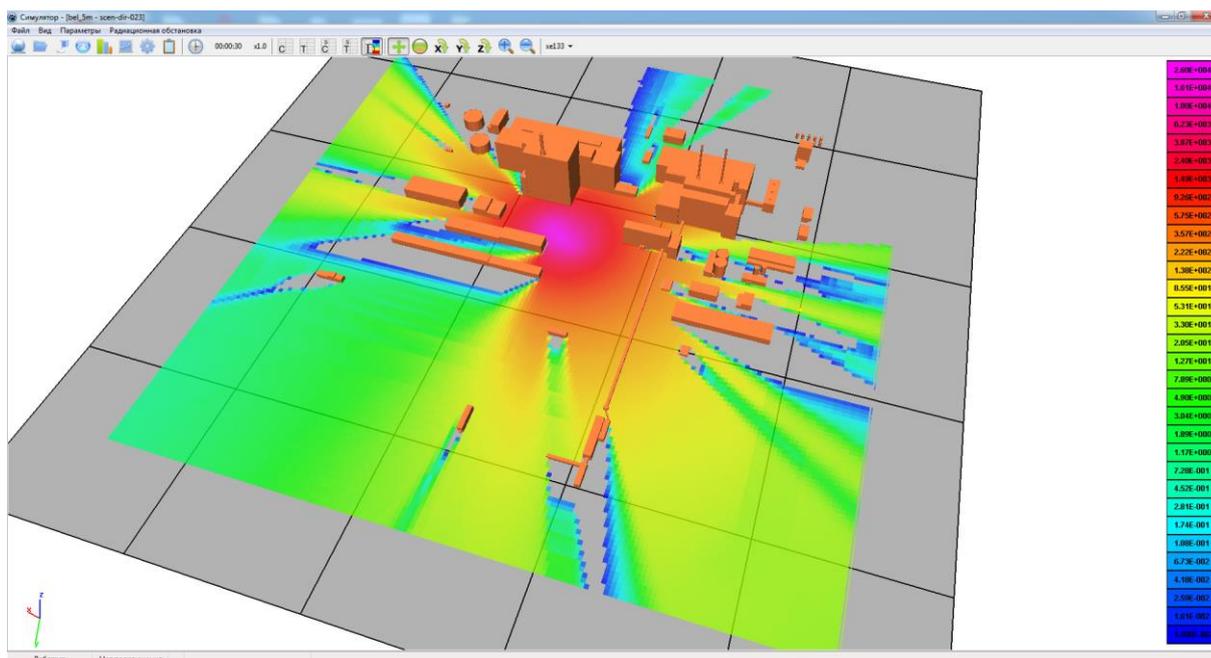


Рисунок 4.20. Скорость набора дозы от облака на момент времени 30 с, мкЗв/час

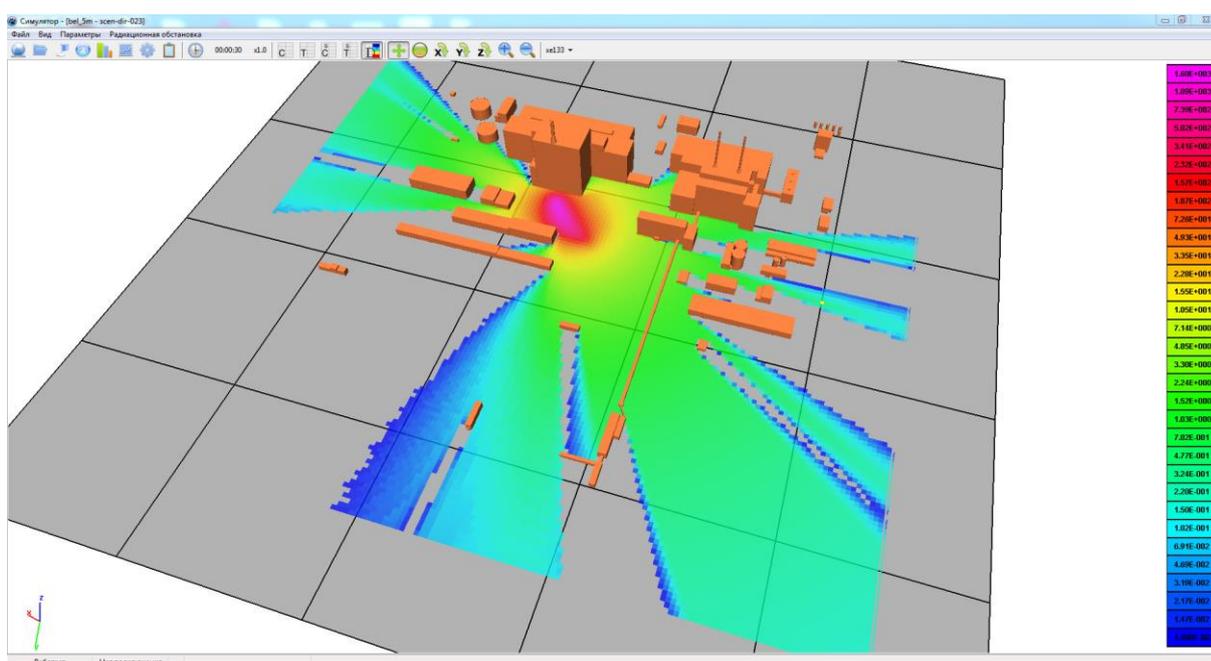


Рисунок 4.21. Скорость набора дозы от поверхности на момент времени 30 с, мкЗв/час

Задание 2. Рассчитать общую скорость набора дозы от ингаляции, облака и поверхности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-2} мкЗв/час. Изобразить вместе с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe .

Ответ. Скорость набора дозы от всех путей облучения на момент времени 30 с совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe изображена на рисунке 4.22.

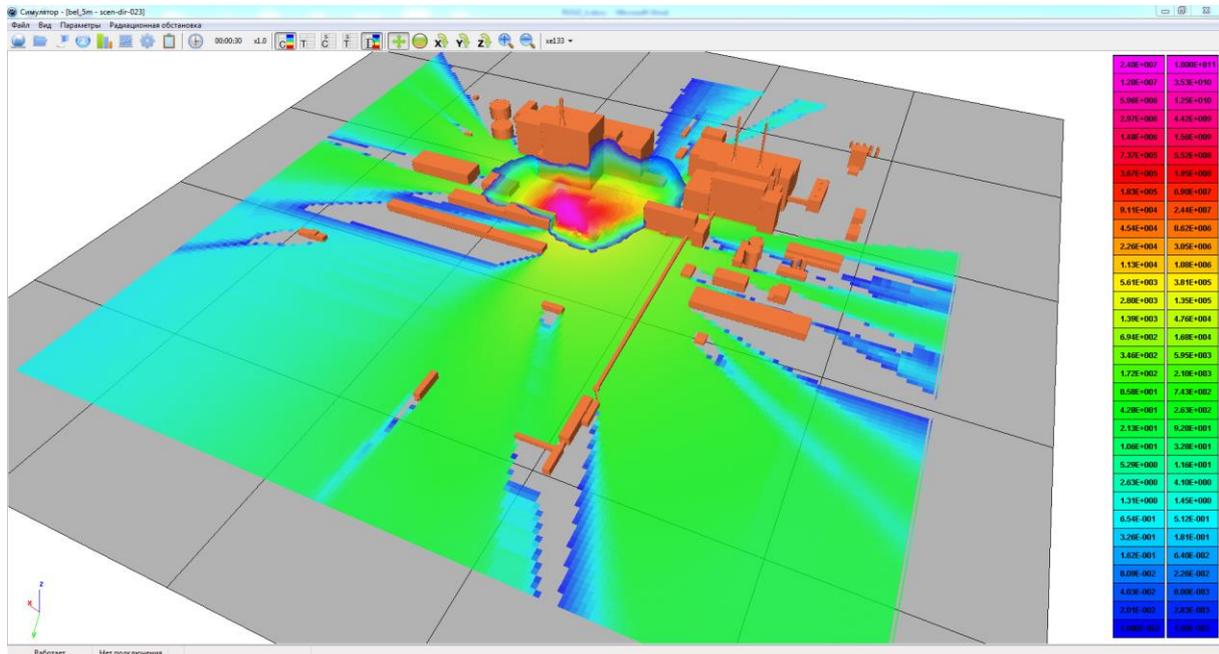


Рисунок 4.22. Общая скорость набора дозы (мкЗв/час) на момент времени 30 с совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe (Бк/м³)

Задание 3. Рассчитать интегральную дозу от ингаляции, облака и поверхности по-отдельности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-8} мЗв.

Ответ. Интегральные дозы от соответствующих путей облучения на момент времени 30 с изображены на рисунках 4.23—4.25.

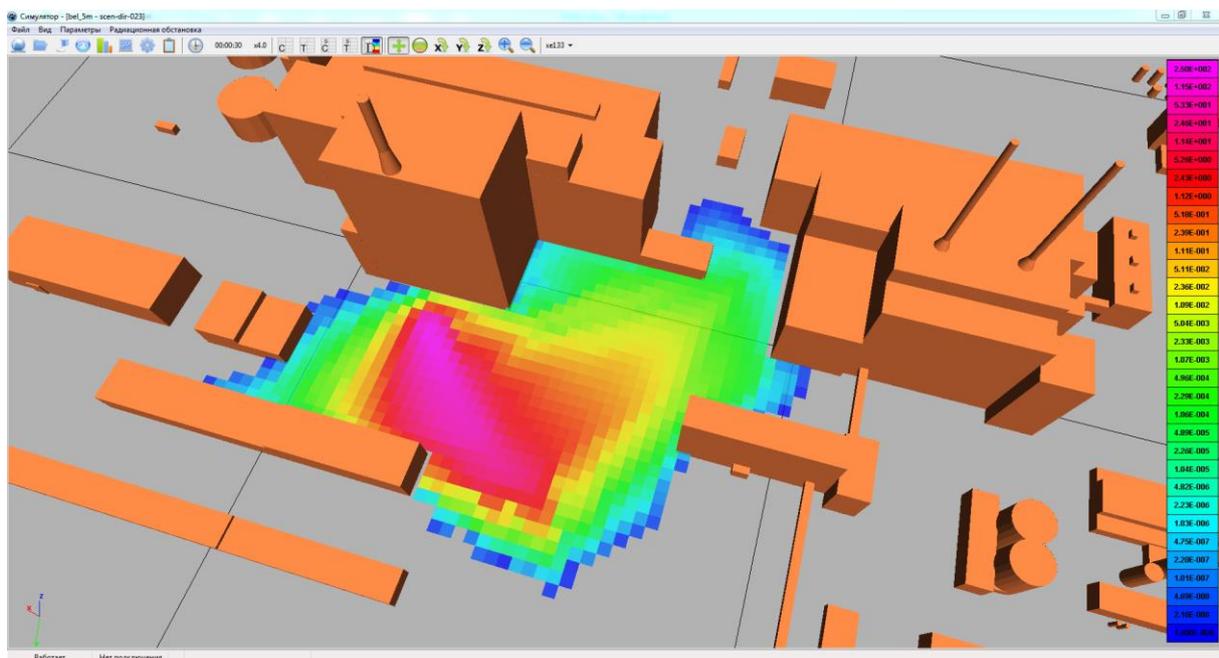


Рисунок 4.23. Интегральная доза от ингаляции на момент времени 30 с, мЗв

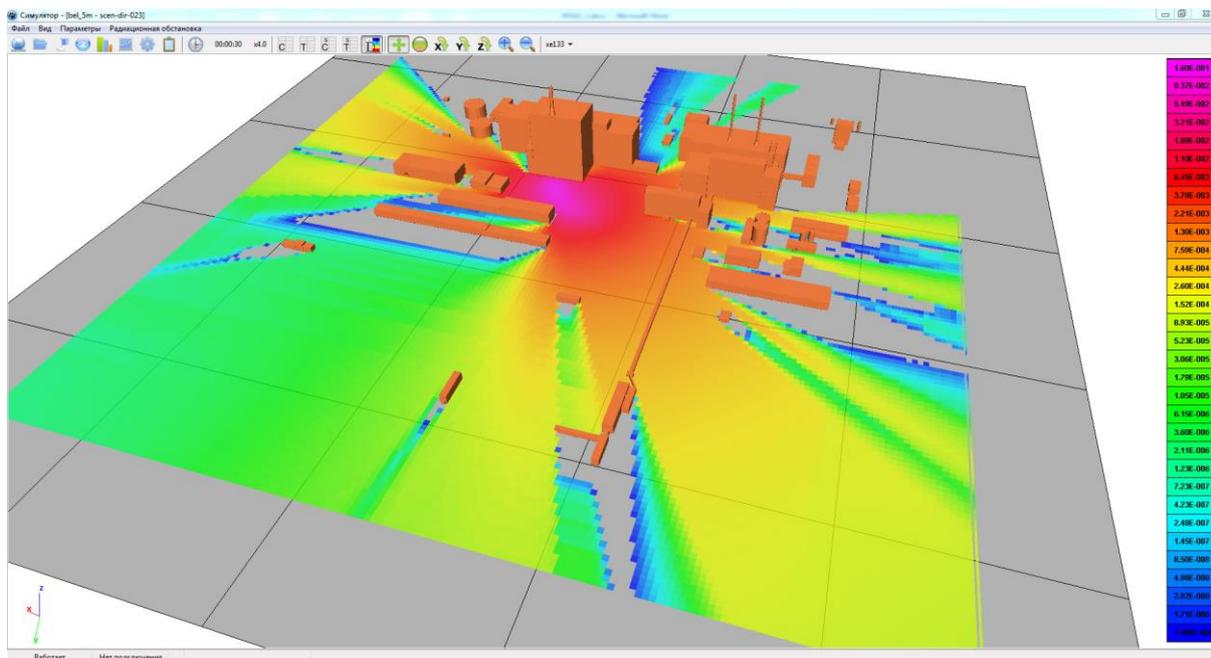


Рисунок 4.24. Интегральная доза от облака на момент времени 30 с, мЗв

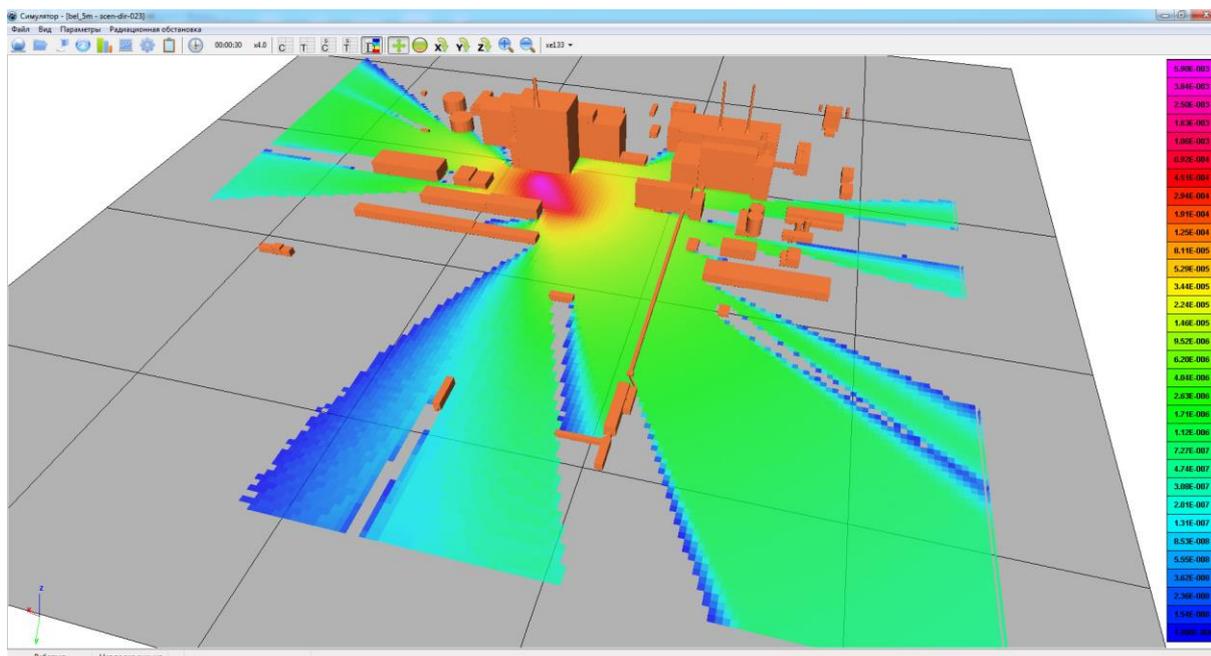
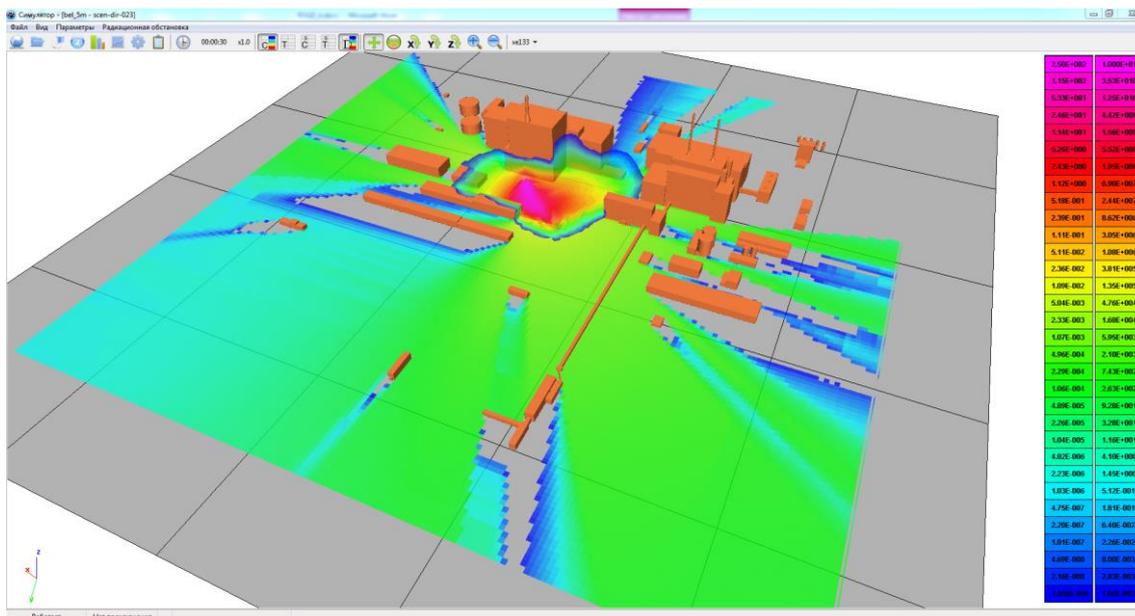


Рисунок 4.25. Интегральная доза от поверхности на момент времени 30 с, мЗв

Задание 4. Рассчитать общую дозу от ингаляции, облака и поверхности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-8} мЗв. Изобразить вместе с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe .

Ответ. Интегральная доза от всех путей облучения на момент времени 30 с совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe изображена на рисунке 4.26.



Задание 5. Рассчитать эффективную дозу облучения на персонал при перемещении по траектории, изображенной на рисунке 4.28 (из центра карты «А» в конечную точку «Б») в течение минуты расчетного времени после выброса.

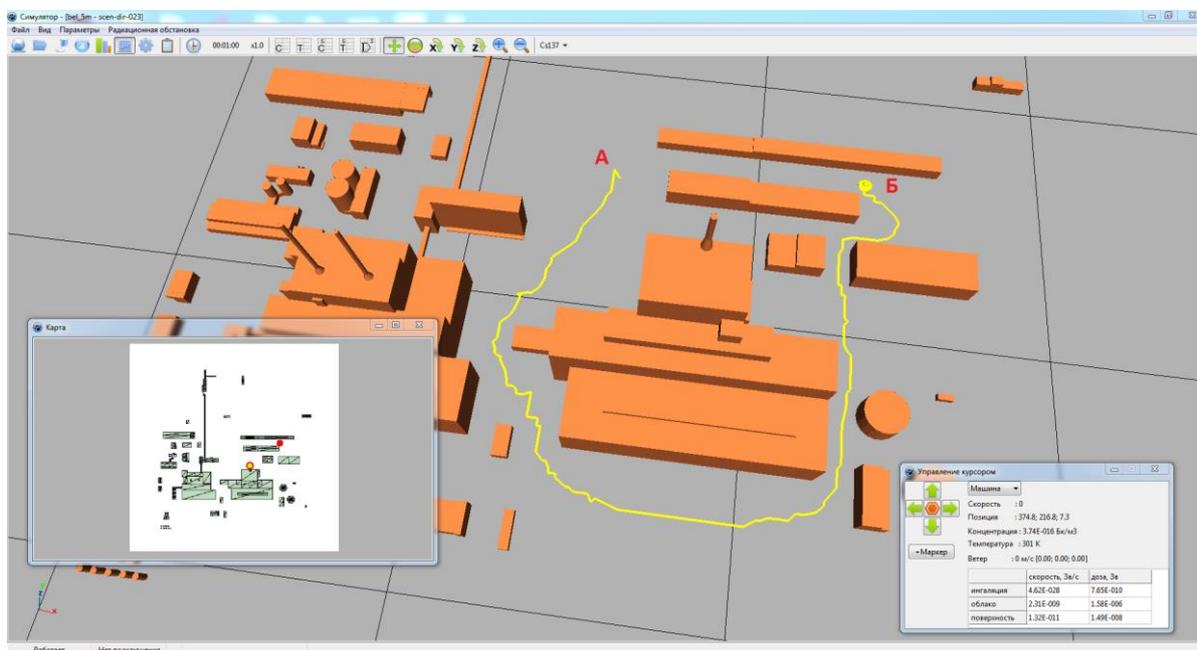


Рисунок 4.28. Расчетная траектория

Ответ. В «Настройки» → «Дозы» в поле «Возрастная категория» необходимо выбрать «staff», а в поле «Орган» значение «эфф». Для перемещения по площадке можно воспользоваться окном «Карта», и передвигать курсор с помощью «мышки». В данном случае пользователь сам определяет скорость перемещения. При передвижении в окне «Локальный вид» курсор движется с постоянной скоростью, которую можно уменьшать или увеличивать. В обоих случаях, при передвижении курсора по карте скорость набора дозы и интегральная доза будут отображаться в окне «Управление курсором». След курсора в окне «Локальный вид» показан на рисунке 4.29 (вид из точки «Б»).

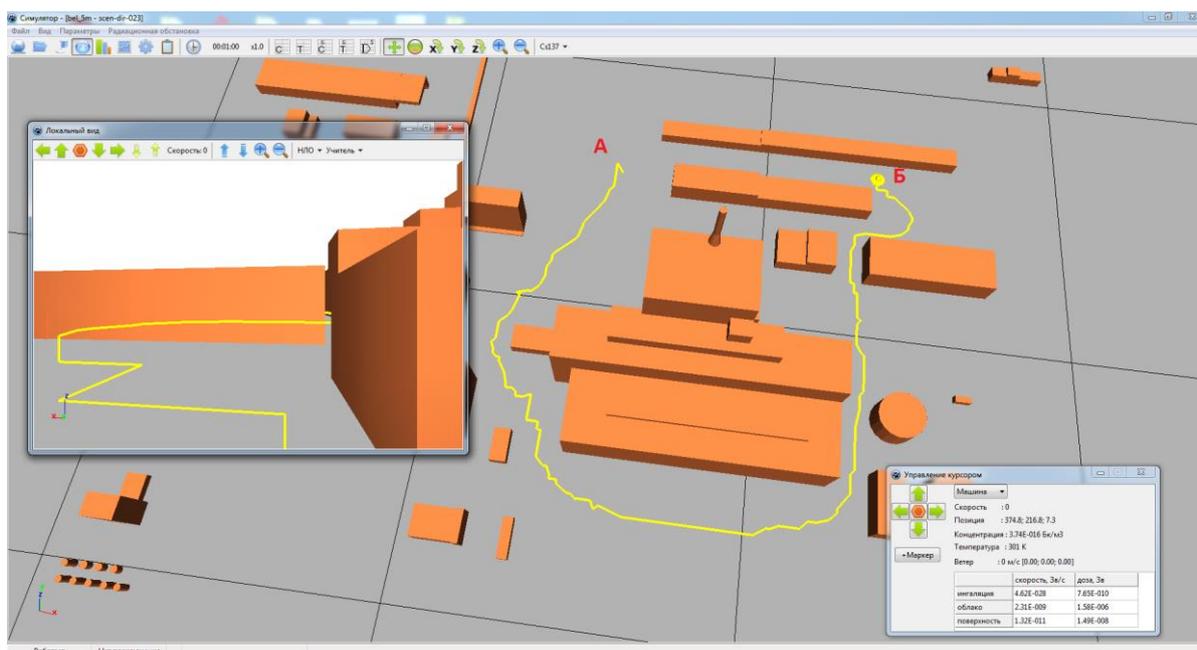


Рисунок 4.29. След курсора в окне «Локальный вид»

В данном примере авторами были получены следующие значения интегральной дозы: от *ингаляции* $7,65 \times 10^{-10}$ Зв, от *облака* $1,58 \times 10^{-6}$ Зв, от *поверхности* $1,49 \times 10^{-8}$ Зв. Значения, полученные пользователем, могут отличаться от приведенных выше, поскольку присутствует некоторая вариация при задании траектории и скорости перемещения по карте.

4.3.2. Сценарий 2

Параметры сценария:

- время расчета — 600 с;
- частота сброса на запись — 10 с;
- направление ветра — 338 град;
- скорость ветра на высоте 10 м — 3 м/с;
- параметр шероховатости — 0,1 м;
- класс устойчивости атмосферы — «G — Сильно устойчивая»;
- температурная стратификация имеет линейный профиль (вблизи поверхности — 300 К, на высоте 100 м — 306,3 К);
- широта, на которой расположен объект — 57;
- сезон — «теплый»;
- координаты источника $X = 260$, $Y = 130$, $Z = 10$;
- источник:
 - ^{137}Cs , суммарная активность — 5×10^{13} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0,008 м/с,
 - ^{133}Xe , суммарная активность — $9,5 \times 10^{14}$ Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0 м/с,
 - ^{135}Xe , суммарная активность — 7×10^{11} Бк, скорость осаждения (вертикальная и горизонтальная) — 0 м/с;
- график затухания источника — источник постоянный в течение 20 с.

Работа с симулятором. Упражнения на повторение

Задание 1. Построить проекцию поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$. Добавить изоповерхности мгновенной концентрации для одного из элементов на момент времени 60 с. Настроить легенду.

Ответ. Проекция поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$ и изоповерхности мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 60 с изображены на рисунке 4.30.

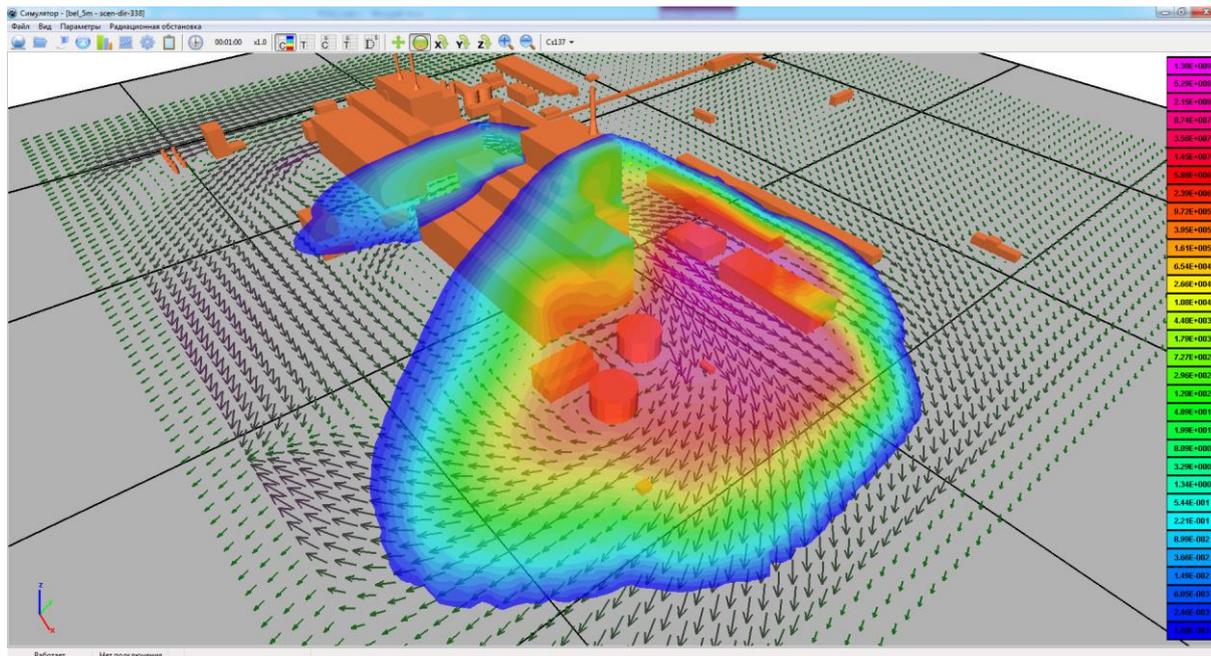


Рисунок 4.30. Вид проекции поля скорости ветра на плоскость $Z = 5$ и изоповерхностей мгновенной концентрации ^{137}Cs на момент времени 60 с

Задание 2. Построить осаднения ^{137}Cs на поверхности элементов застройки на конец расчетного времени (600 с.). Настроить легенду.

Ответ. Вид осаднений изображен на рисунке 4.31.

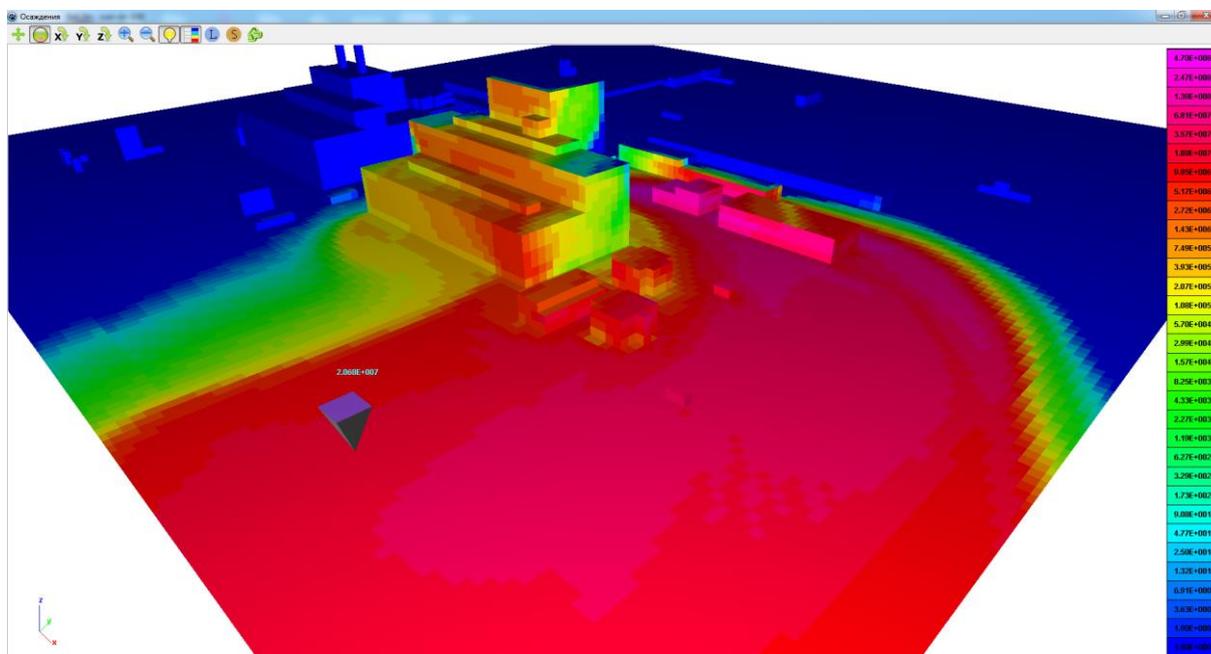


Рисунок 4.31. Вид осаднений ^{137}Cs на момент времени 600 с

Работа с симулятором. Расчет доз.

Задание 1. Рассчитать скорость набора дозы от ингаляции, облака и поверхности отдельности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-2} мкЗв/час.

Ответ. Скорость набора дозы от соответствующих путей облучения на момент времени 30 с. изображены на рисунках 4.32—4.34.

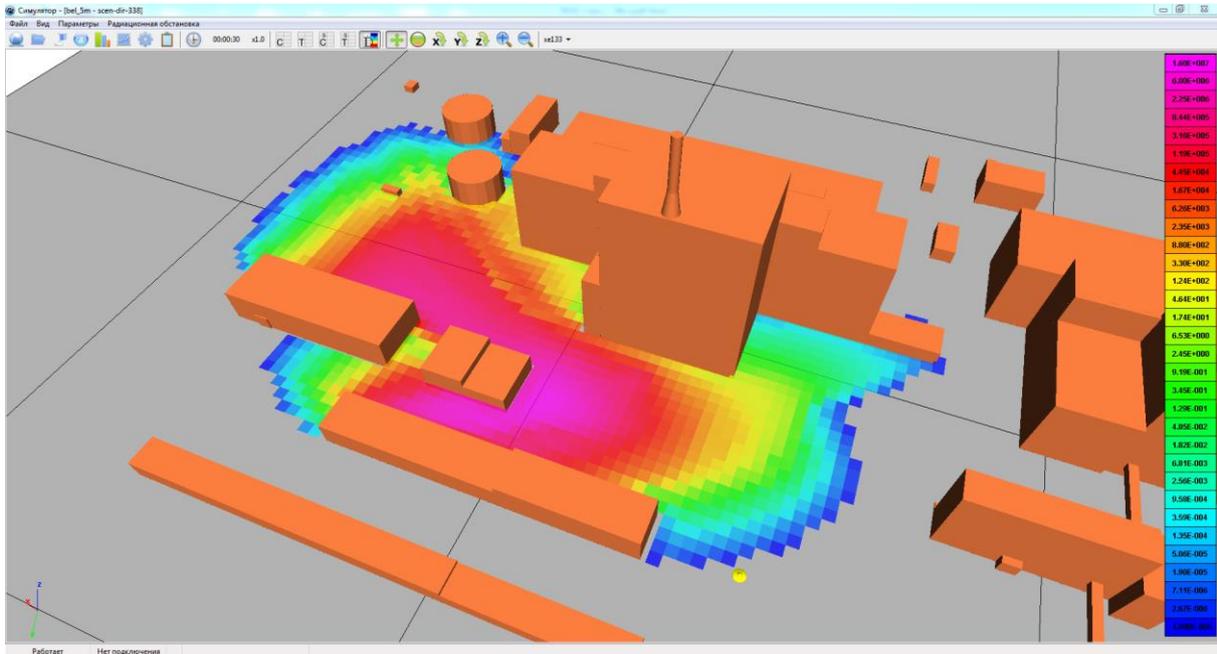


Рисунок 4.32. Скорость набора дозы от ингаляции на момент времени 30 с, мкЗв/час

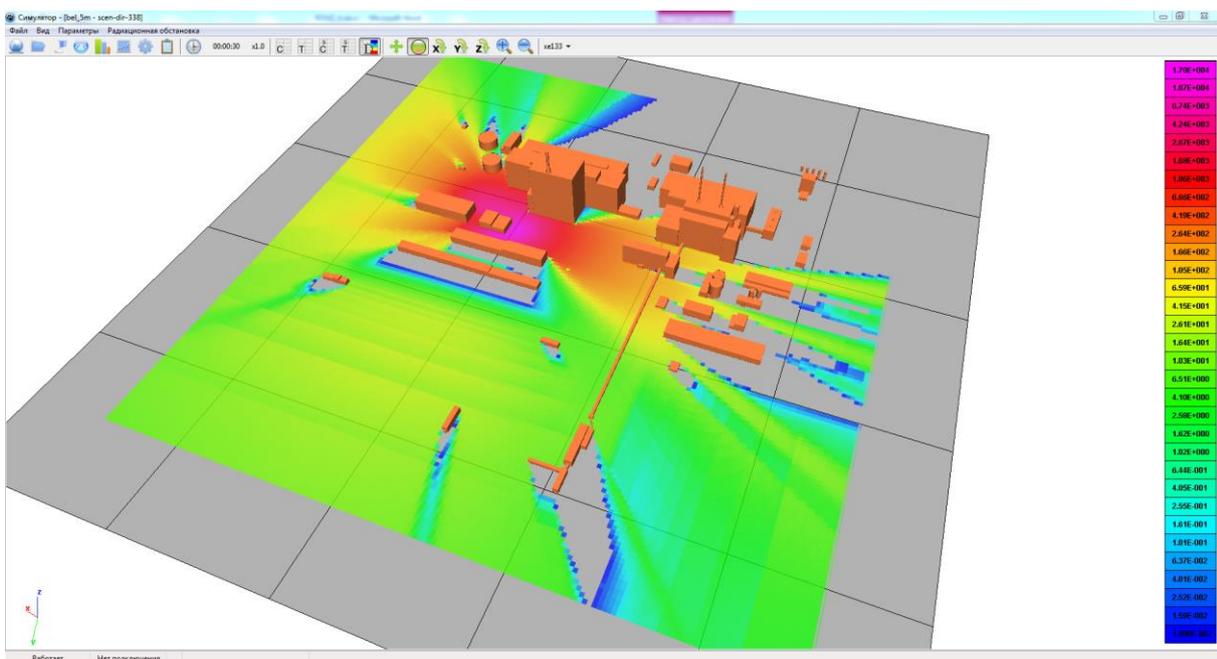


Рисунок 4.33. Скорость набора дозы от облака на момент времени 30 с, мкЗв/час

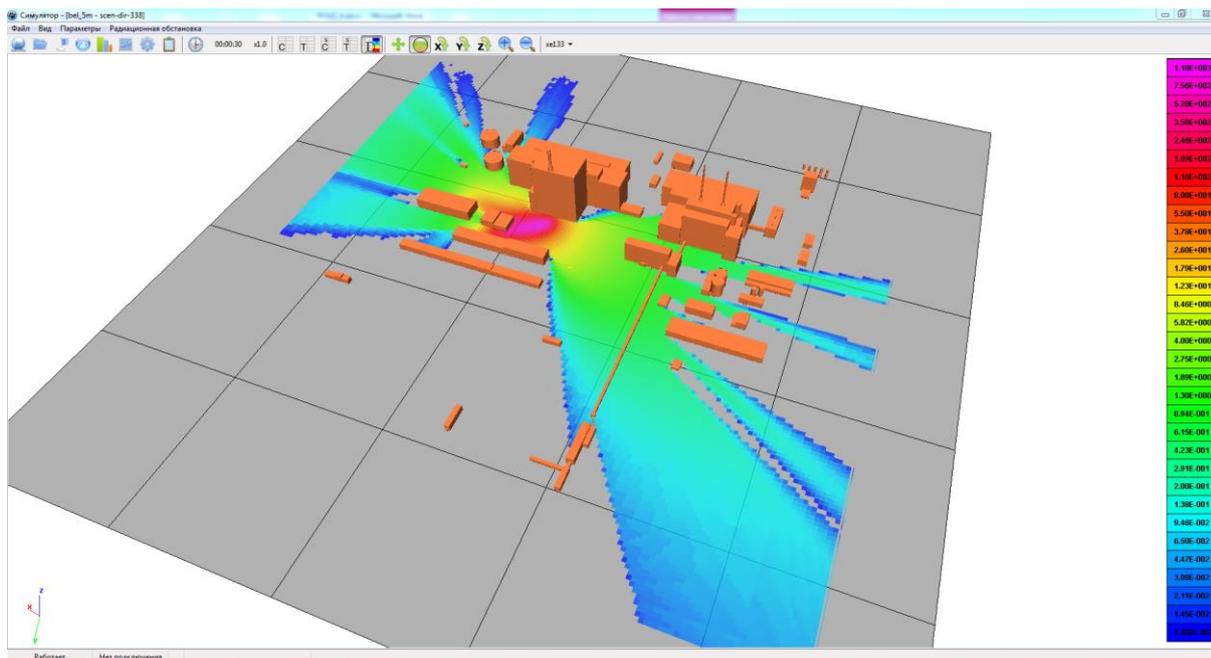


Рисунок 4.34. Скорость набора дозы от поверхности на момент времени 30 с, мкЗв/час

Задание 2. Рассчитать общую скорость набора дозы от ингаляции, облака и поверхности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-2} мкЗв/час. Изобразить вместе с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe .

Ответ. Скорость набора дозы от всех путей облучения на момент времени 30 с совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe изображена на рисунке 4.35.

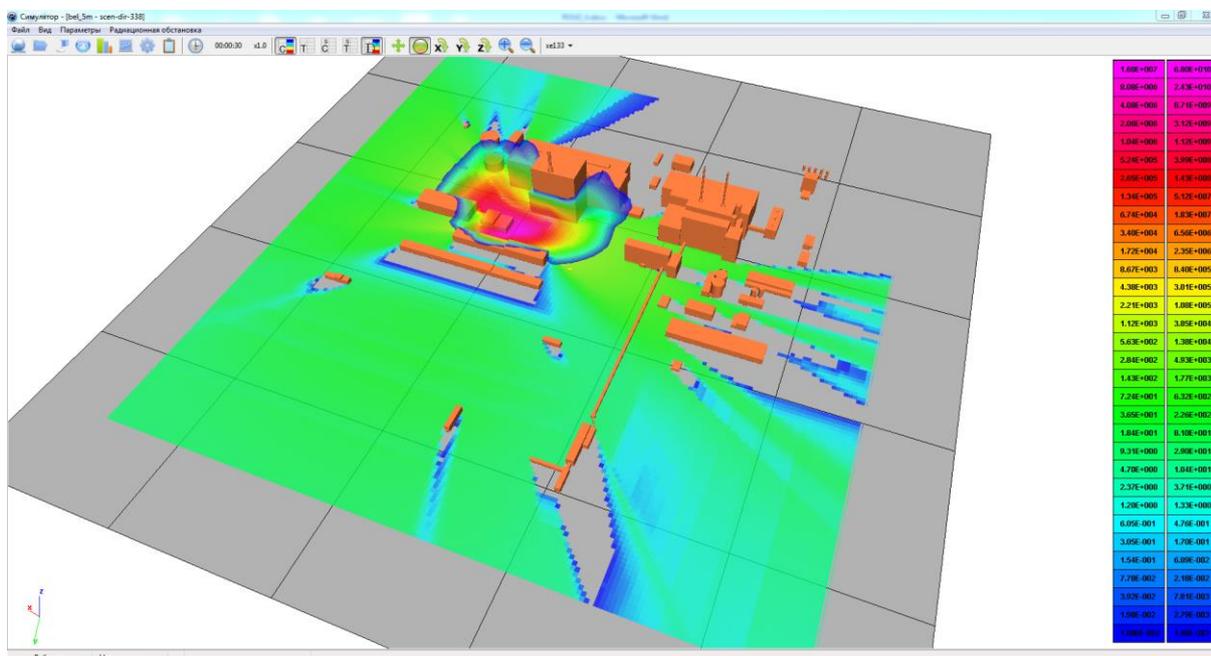


Рисунок 4.35. Общая скорость набора дозы (мкЗв/час) на момент времени 30 с совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe (Бк/м³)

Задание 3. Рассчитать интегральную дозу от ингаляции, облака и поверхности по отдельности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-8} мЗв.

Ответ. Интегральные дозы от соответствующих путей облучения на момент времени 30 с изображены на рисунках 4.36—4.38.

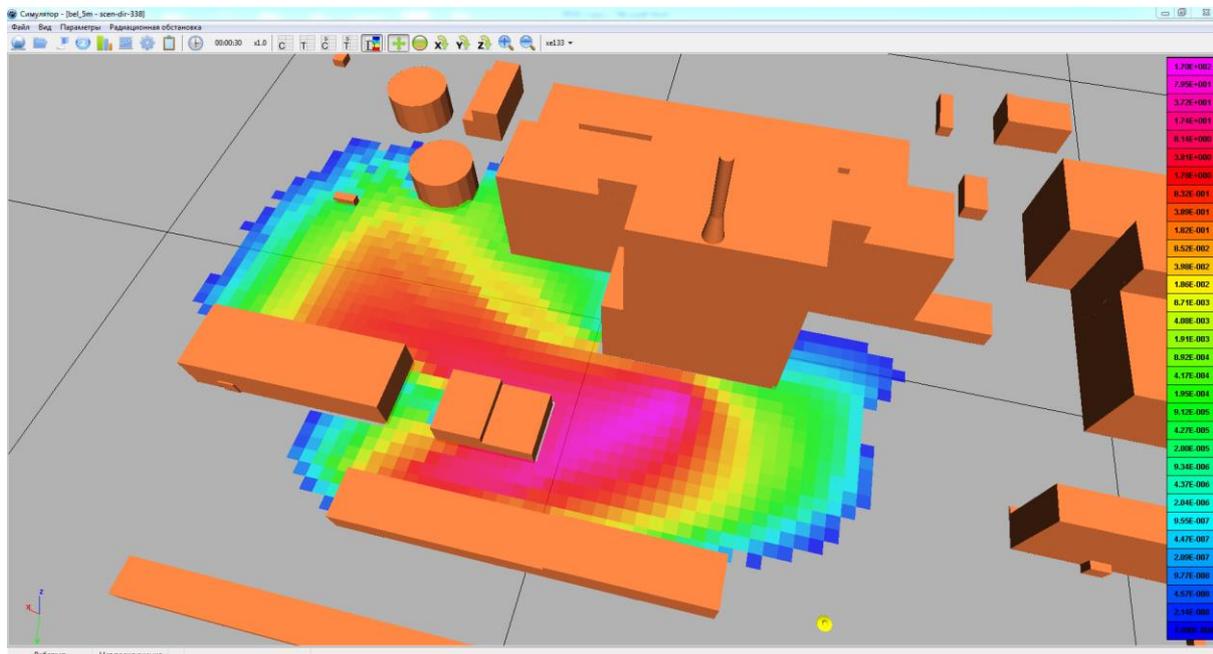


Рисунок 4.36. Интегральная доза от ингаляции на момент времени 30 с, мЗв

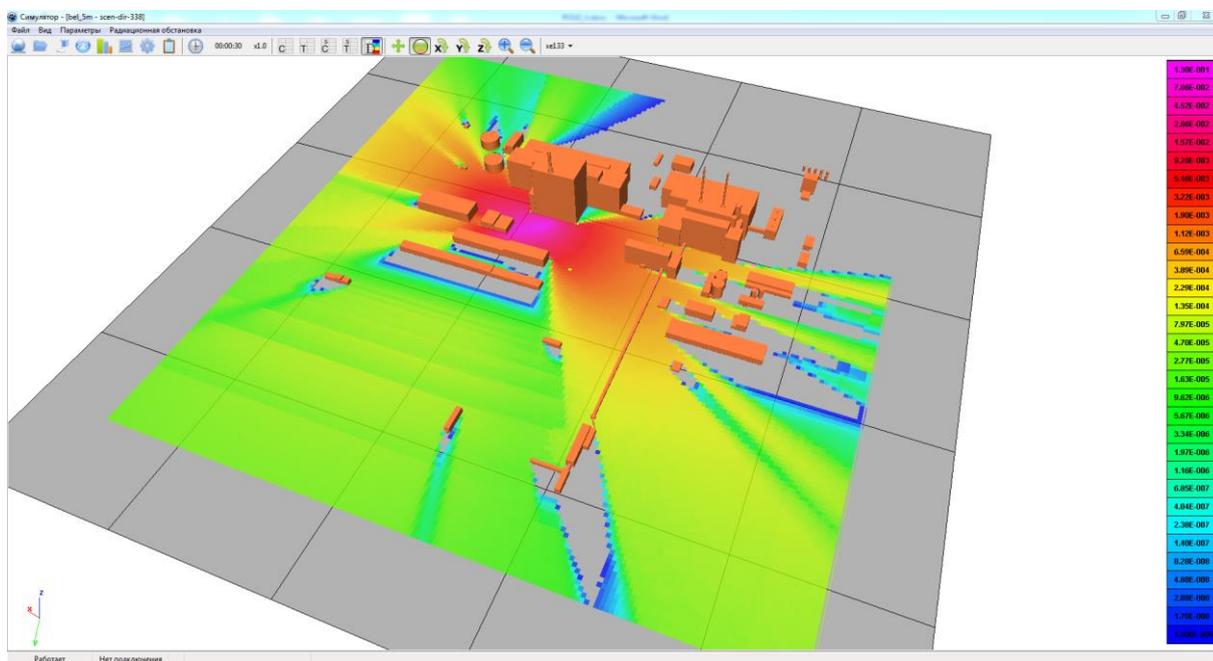


Рисунок 4.37. Интегральная доза от облака на момент времени 30 с, мЗв

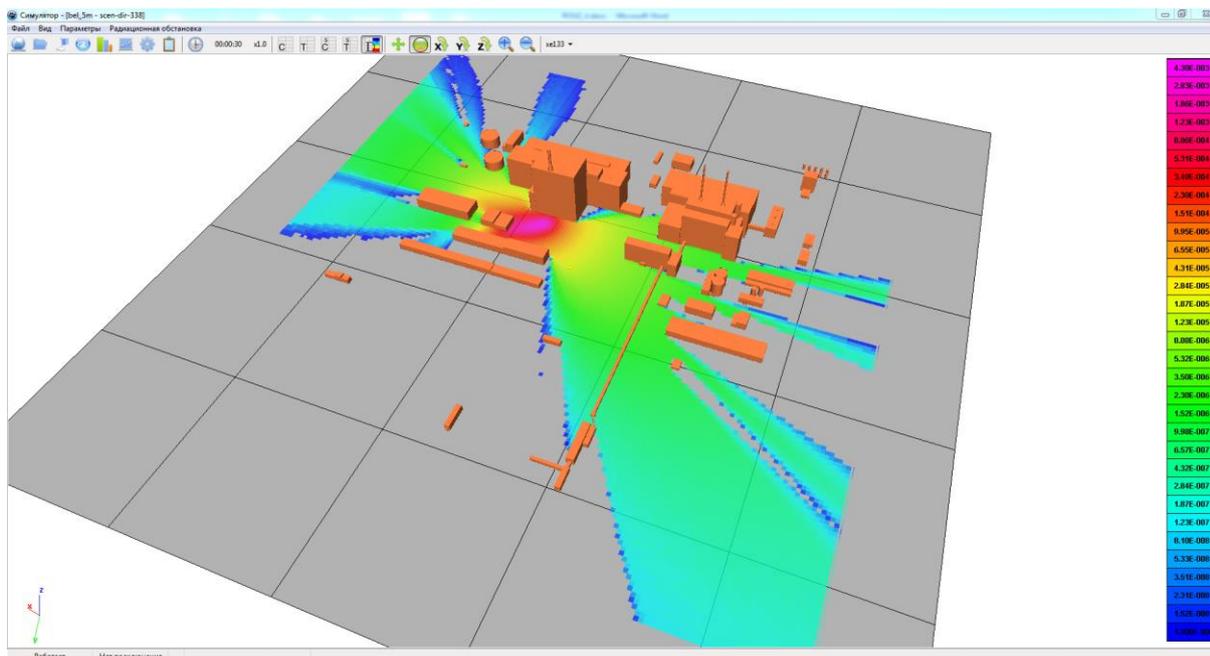


Рисунок 4.38. Интегральная доза от поверхности на момент времени 30 с мЗв

Задание 4. Рассчитать общую дозу от ингаляции, облака и поверхности на момент времени 30 с. Настроить легенду, выбрав минимальный уровень 10^{-8} мЗв. Изобразить вместе с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe .

Ответ. Интегральная доза от всех путей облучения на момент времени 30 с. совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe изображена на рисунке 4.39.

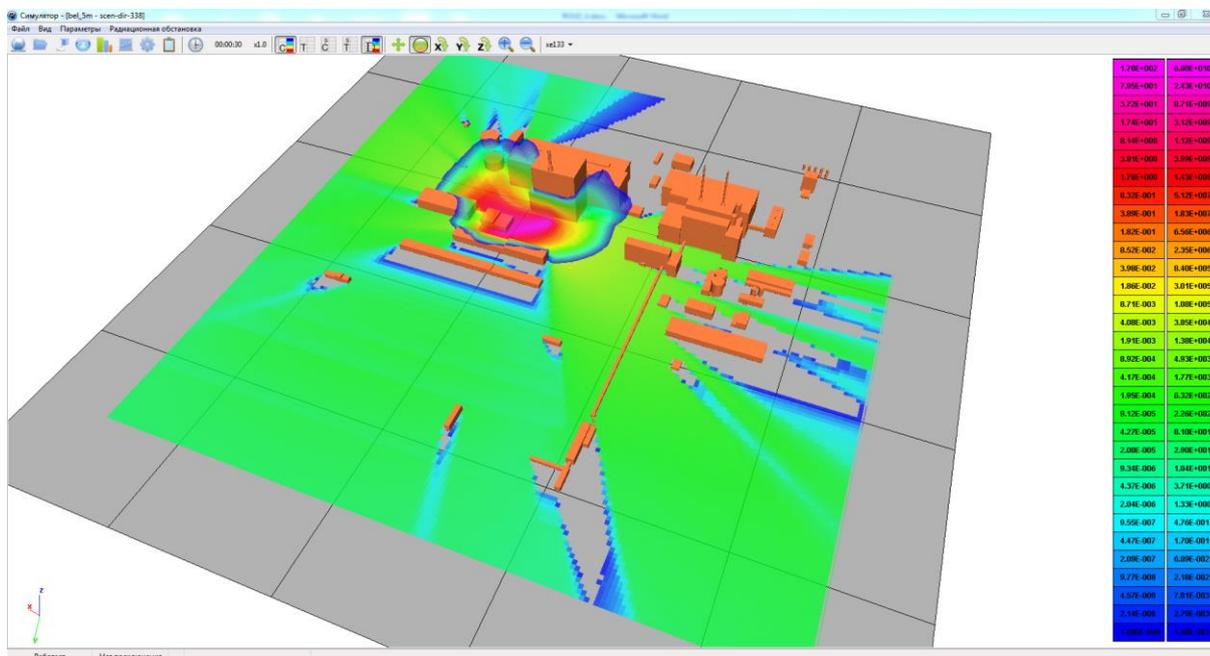


Рисунок 4.39. Интегральная доза (мЗв) от всех путей облучения на момент времени 30с. совместно с изоповерхностями мгновенной концентрации ^{133}Xe (Бк/м³)

Задание 5. Рассчитать эффективную дозу облучения на персонал при перемещении по траектории А-Б (рисунок 4.40) в течение минуты расчетного времени после выброса.

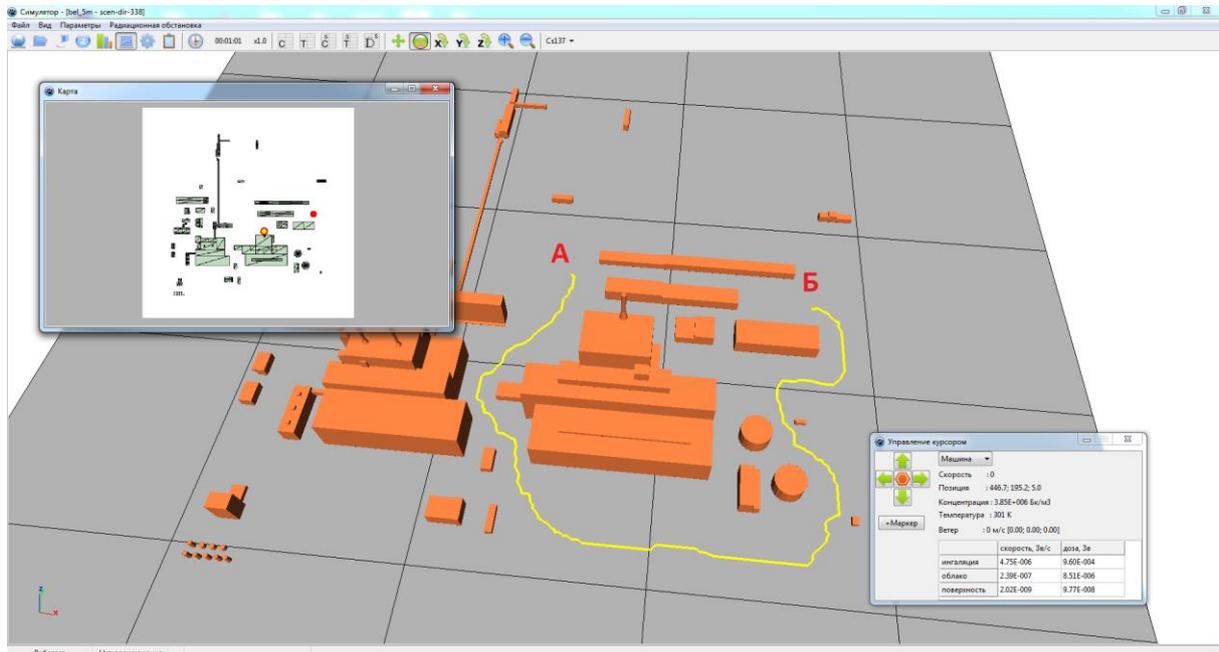


Рисунок 4.40. Расчет дозы при перемещении по площадке

Ответ. В «Настройки» → «Дозы» в поле «Возрастная категория» необходимо выбрать «staff», а в поле «Орган» значение «эфф». Для перемещения по площадке можно воспользоваться окном «Карта», и передвигать курсор с помощью «мышки». Также можно передвигаться с помощью стрелок в окне «Локальный вид», тогда курсор движется с постоянной скоростью, которую можно уменьшать или увеличивать. В обоих случаях, при передвижении курсора по карте скорость набора дозы и интегральная доза отображаются в окне «Управление курсором».

В данном примере авторами были получены следующие значения интегральной дозы: от ингаляции $9,6 \times 10^{-4}$ Зв, от облака $8,51 \times 10^{-6}$ Зв, от поверхности $9,77 \times 10^{-8}$ Зв. Значения, полученные пользователем, могут отличаться от приведенных выше, поскольку присутствует некоторая вариация при задании траектории и скорости перемещения по карте.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Справочник. Атмосфера. — Л. : Гидрометеиздат, 1991. — 509 с.
- 2 Чуданов В. В. Численные схемы для решения уравнений Навье—Стокса с переменной плотностью для несжимаемых и слабосжимаемых течений / В. В. Чуданов // Методы вычислительной гидродинамики для анализа безопасности объектов ТЭК. : Труды ИБРАЭ РАН / В. В. Чуданов, А. Е. Аксенова, В. А. Первичко, А. Г. Чурбанов. — М. : Наука, 2008. — Вып. 3. — С. 81—111.
- 3 «Отчет. Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного цикла», государственный контракт от 17.02.2014 N Н.4х.44.9 Б.14.1037, 2014.
- 4 Zhang Y. Q., Arya S. P., Snyder W. H. A comparison of numerical and physical modelling of stable atmospheric flow and dispersion around a cubical building. Atmospheric Environment. — 1996. — Vol. 30, No. 8, pp. 1327—1345.
- 5 Hanna S., Hansen O., Dharmavaram S. FLACS CFD air quality model performance evaluation with Kit Fox, MUST, Prairie Grass, and EMU observations. Atmos. Environ, 38. — 2004. — Issue 12, pp. 4675—4687.
- 6 Глазунов А. В. Вихреразрешающее моделирование турбулентности с использованием смешанного динамического локализованного замыкания. — Известия РАН : Физика атмосферы и океана, 2009. — № 45. — С. 7—42.
- 7 Williams Michael D., Brown Michael J., Singh Balwinder, Boswell David. QUIC-PLUME 2008 Theory Guide http://www.lanl.gov/projects/quic/open_files/QUIC-PLUME_theory.pdf.
- 8 Ye Li. Numerical evaluation of wind-induced dispersion of pollutants around buildings. Thesis 1998, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada.
- 9 Дубков А. П., Тимошинов Н. А. «DOSА_M» — программное средство для расчета доз облучения населения вокруг атомных станций при авариях. Верификационный отчет. — М., 1998.
- 10 Головизнин В. М., Балансно-характеристический метод численного решения одномерных уравнений газовой динамики в эйлеровых переменных. — Матем. моделирование, 18:11 . — 2006. — С. 14—30.
- 11 Глотов В. Ю., Головизнин В. М. Схема «КАБАРЕ» для двумерной несжимаемой жидкости в переменных давление-скорость // Журнал вычислительной математики и математической физики. — 2013. — Т. 53, № 6 — С. 721—735.
- 12 Кондаков В. Г., Схема «КАБАРЕ» для двумерной задачи термоконвекции. — Матем. моделирование, 25:1. — 2013. — С. 33—44.
- 13 Головизнин В. М., Карабасов С. А., Кондаков В. Г. Обобщение схемы «КАБАРЕ» на двумерные ортогональные расчетные сетки. — Матем. моделирование, 25:7. — 2013. — С. 103—136.
- 14 Родионов А. В., Сопоставление схемы «КАБАРЕ» со схемами типа MUSCL. — Матем. моделирование, 25:9. — 2013. — С. 109—136.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

В. Н. Семенов, О. С. Сорокинина, В. Д. Дзама, Д. В. Благодатских

Трехмерный код расчета
радиационной обстановки на
промышленной площадке АЭС
с учетом застройки

УЧЕБНАЯ ВЕРСИЯ Е1.0

Роуз/Е1.0

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактура, корректура: *Суркова И. Е.*

Дизайн и верстка: *Митрофанова И. А., Наконечная Е. Л.*

Художественное оформление обложки: *Пузанков К. В.*

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Иллюстрации и списки литературы приведены в авторской редакции

Сдано в набор 10 мая 2018 г. Подписано в печать 19.09.2018

Формат 60×90¹/₈. Бумага офсетная 80 г/м²

Гарнитура «Times New Roman», «Arial»

Уч.-изд. л. 7,13. Усл.-печ. л. 9,5

Заказное