

УДК 502.3:630.20

А. А. Андрижиевский, д-р техн. наук (БГТУ); А. Г. Трифонов, д-р техн. наук (БГТУ);
Э. А. Михалычева, науч. сотрудник (БГТУ); В. В. Радкевич, мл. науч. сотрудник
(ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси)

МОДЕЛИРОВАНИЕ МИГРАЦИИ ТЕПЛОВЫХ И АЭРОЗОЛЬНЫХ ВЫБРОСОВ В ИНФРАСТРУКТУРЕ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ И НА ПРИЛЕГАЮЩИХ ТЕРРИТОРИЯХ

В статье приводятся результаты применения многомерного компьютерного моделирования для анализа миграции тепловых и аэрозольных выбросов атомной электростанции. Рассматривается нижний приземный ярус воздушных масс, ответственный за выброс и локализацию атмосферного загрязнения. Полученные данные предполагается в дальнейшем использовать для расчета дозовых нагрузок и оценки риска.

The results of application of multidimensional computer modeling for the analysis of migration of thermal and aerosol emissions at the Nuclear Power Plant are resulted. It is considered the bottom layer of air mass responsible for emission and localization of atmospheric pollution. It is supposed further the obtained data to use for radiation dose calculation and risk estimation.

Введение. В настоящее время достаточно остро стоят вопросы атомной энергетики. Развитие данной отрасли экономики в первую очередь определяется успешной реализацией проблем безопасности и экономической эффективности АЭС. В связи с этим возникла задача ограничения загрязняющих выбросов в воздушный и водный бассейны, а также более полного использования их естественной рассеивающей способности.

Анализ проблемы. Выделяют такие основные виды воздействия от АЭС, как радиационное, тепловое и химическое.

В процессе эксплуатации АЭС возможно образование различных примесных веществ.

Воздействие выбросов может рассматриваться в двух аспектах:

– локальное воздействие – для того или иного участка земли за тот или иной промежуток времени;

– глобальное воздействие – общее воздействие в целом с учетом нарастающих темпов во времени.

Локальное воздействие выбросов в атмосферу применительно к типовым параметрам АЭС (мощность выбросов, высота вентиляционных труб) оценивается в округе диаметром участка 20–50 км на краткосрочных промежутках времени и даже при разовых поступлениях загрязнений.

Глобальное воздействие выбросов оценивается в масштабе крупных регионов, отдельных стран и планеты в целом на длительных исторических периодах.

Особенности этих воздействий зависят от того, в какую именно сферу поступают вредные выбросы и как они взаимодействуют друг с другом.

Газообразные отходы выделяются при дегазации различных протечек теплоносителя, в бассейнах выдержки отработанного топлива, при дегазации растворов в баках выдержки. Отводи-

мые из контура и технологического оборудования газы состоят обычно из азота и водорода, содержат примеси водяного пара и газообразные продукты деления – радионуклиды Kr, Xe, Ar.

Могут также образовываться радиоактивные отходы в форме аэрозолей – микрокапли жидких радиоактивных сред и уносимые газовым потоком твердые микрочастицы.

Аэрозоли могут появляться в результате протечек теплоносителя.

Радиоактивные аэрозоли и изотопы радиоактивного йода, которые чаще всего возникают при истечении теплоносителя, удаляются из помещений вентиляционными системами.

В случае ввода станции в эксплуатацию ожидается дополнительное ежегодное поступление в атмосферу радиоактивных выбросов (в расчете на один год непрерывной работы на номинальной мощности одного энергоблока) в количестве более 50 ТБк (таблица) [1].

Нормализованные выбросы в атмосферу от работы одного блока ВВЭР-1000

Виды радиоактивных выбросов	Суммарная активность, ТБк/(ГВт·год)
1. Радиоактивные благородные газы	48
2. Тритий	2,8
3. Долгоживущие радионуклиды	1
4. Углерод-14	0,2
5. Йод-131	1,2
<i>Всего</i>	53,2

Моделирование аэрозольной дисперсии. Перенос радиоактивных веществ в атмосфере и осаждение их на поверхности земли представляет собой достаточно сложную и многогранную задачу. Распространение радиоактивного облака подвержено влиянию различных факторов, таких как климатические, орографические и т. д.

Одной из характеристик состояния климатической системы является общая циркуляция атмосферы, которая оказывает большое влияние на формирование климатического режима отдельных регионов. К основным объектам общей циркуляции атмосферы относятся области пониженного (циклоны) и повышенного (антициклоны) давления.

Атмосферные процессы являются основным фактором, определяющим рассеивающую способность атмосферы (РСА) над любым пунктом территории. Состоянием циркуляции обусловлены аэроклиматические параметры и характеристики пункта, в том числе: повторяемость, мощность и интенсивность температурных инверсий (приземных, когда повышение температуры непосредственно начинается с поверхности земли, и приподнятых – повышение температуры начинается с некоторой высоты от поверхности), направление и скорость ветра на высотах, которые необходимы для расчета РСА.

Ветровой режим является главным фактором, определяющим рассеяние примесей. С ветром связан горизонтальный перенос загрязняющих веществ, удаление их от источника выбросов и вынос за пределы 30-километровой зоны.

Неблагоприятные для рассеяния примесей и самоочищения атмосферы условия формируются при слабых ветрах со скоростью до 2 м/с и штилях.

Одной из основных климатических характеристик, отражающих особенности термического режима района, является средняя месячная температура воздуха. Годовой ход ее зависит от радиационных условий и сезонных изменений циркуляции атмосферы и характеризуется небольшими колебаниями от месяца к месяцу зимой и летом и резкими – в переходные сезоны (весной и осенью).

Влажность воздуха определяется содержанием в воздухе водяных паров. От влажности воздуха зависят природные процессы – интен-

сивность испарения с поверхности водоемов и почвы, транспирация влаги растениями, возникновение заморозков, образование туманов.

Влажность воздуха характеризуется следующими показателями: парциальным давлением водяного пара, относительной влажностью, дефицитом насыщения.

Годовой ход относительной влажности воздуха характеризуется наибольшими значениями в холодный период года и наименьшими – в теплый, тогда как годовой ход парциального давления и дефицита насыщения повторяет годовой ход температуры воздуха, то есть наибольшие значения этих показателей наблюдаются в наиболее жаркие летние месяцы, а наименьшие – в зимние месяцы.

В настоящее время для анализа состояния приземного слоя преимущественно используются методики расчета на основе гауссовых моделей рассеяния примеси. Они содержат рекомендации для определения дисперсий по входным метеорологическим параметрам. Однако проведение детальных компьютерных расчетов сталкивается с рядом ограничений по использованию гауссовых моделей рассеивания [2]:

- в гауссовых моделях примесь распространяется только по прямой, а скорость ветра при этом равна константе;
- гауссовы модели «ломаются» при низкой скорости ветра. Для достижения устойчивого счета скорость ветра в моделях должна быть более 0,5–1,0 м/с;
- рассматриваются только прямые траектории, т. е. не учитывается их кривизна;
- пространственно условия должны быть однородными;
- достоверность расчета достигается только в достаточно «малой» расчетной области;
- существуют трудности по внесению начальных граничных условий на основе предыдущих расчетов. Нет «памяти» о предыдущих расчетах.

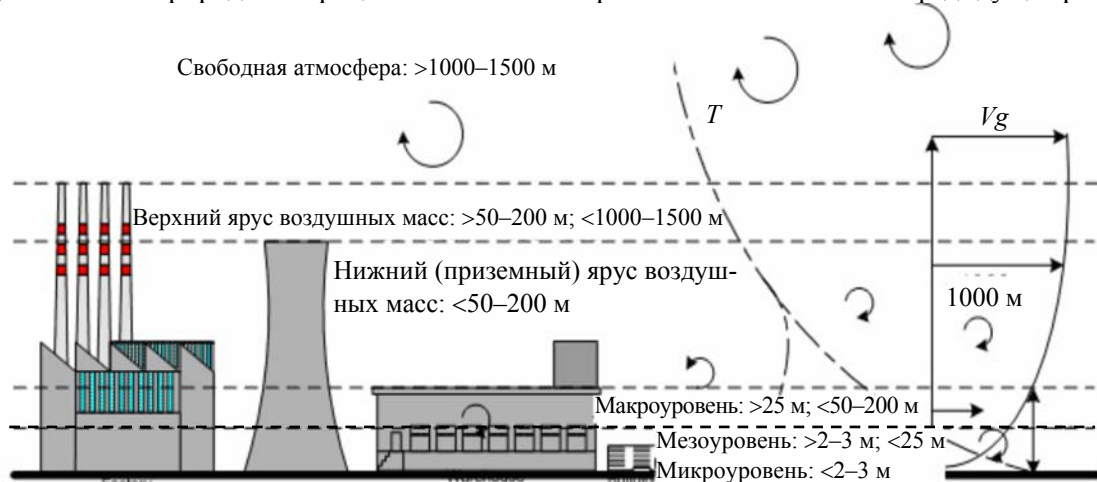


Рис. 1. Структура приземного слоя атмосферы для городских территорий

Основная система уравнений комплексной модели имеет вид [3]:

– уравнение сохранения количества движения:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + g\beta \vartheta \delta_{i3} + \frac{\partial(v \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - U_j' U_i')}{\partial x_j} + J_i;$$

– уравнение сохранения массы:

$$\frac{\partial U_j}{\partial x_j} = 0;$$

– уравнение сохранения энергии:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{L\Phi}{C_p} + \frac{\partial(\lambda \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - U_j' T_j')}{\partial x_j} + J_T;$$

– уравнение переноса радионуклидов:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + U_j \frac{\partial C_k}{\partial x_j} - W_{gk} \frac{\partial C_k}{\partial x_3} = \frac{\partial(D \frac{\partial C_k}{\partial x_j} - U_j' C_k)}{\partial x_j} - \lambda_k C_k + J_{Ck}.$$

Практически во всех промышленно развитых странах осуществляется управление состоянием окружающей среды в смысле ограничения выбросов вредных веществ, в том числе и в атмосферу. Для эффективного управления необходим специальный контроль качества воздуха, который включает ряд ограничений на допустимый объем выбросов, исходя из текущего состава атмосферы. В свою очередь состав воздуха определяется путем непрерывных и периодических измерений в локальных пунктах, а также на мобильных станциях, т. е. путем мониторинга. Даже очень хорошо организованная сеть станций наблюдения не может обеспечить достоверную информацию о качестве воздуха во всем физическом объеме в данном регионе. Необходимо иметь подходящую модель, чтобы распространить данные наблюдения на области, в которых отсутствуют станции мониторинга. Таким образом, возникает проблема математического моделирования качества атмосферного воздуха, тесно связанная с решением задачи о диффузии примесей в атмосфере при заданной величине эмиссии.

Основная задача, которая возникает в связи с моделированием качества воздуха вблизи АЭС, – это расчет турбулентного течения загрязняющих веществ. В данной работе в качестве расчетной модели турбулентного пограничного слоя в приземном слое атмосферы используется модифицированная «к-ε» модель, в которой приняты во

внимание силы плавучести, что важно при моделировании стратифицированных течений.

Поскольку в рамках развиваемой теории турбулентности удастся правильно описать влияние стратификации на средние параметры турбулентного пограничного слоя, полученные результаты используют для моделирования турбулентного переноса примесей в приземном слое атмосферы.

В настоящее время существует достаточно большое количество программных комплексов с возможностью проведения многомерного компьютерного моделирования. Однако каждый конкретный случай применения программных комплексов требует специфических мер по достижению адекватных результатов моделирования при существующих вычислительных средствах. При этом основное внимание уделяется замыкающим соотношениям и получению «устойчивых» расчетов.

Модели рассеивания в атмосфере представляют собой компьютерные программы, которые используют математические алгоритмы для моделирования поведения загрязняющих веществ в атмосфере [2].

Эти модели требуют входные данные, которые включают:

1) метеорологические условия, такие как скорость и направление ветра, атмосферная турбулентность, температура воздуха;

2) параметры выбросов, такие как месторасположение источника и его высота, диаметр вентиляционной трубы и скорость выхода, температура и скорость потока;

3) расположение и высота препятствий (например, зданий и других структур) на пути потока.

Наиболее распространены следующие модели [3]:

- 1) AERMOD;
- 2) НОСТРАДАМУС;
- 3) ЭКОЛОГ;
- 4) COMSOL.

В данной работе использовался программный комплекс COMSOL.

Результаты применения модели описания радионуклидных дисперсий. Была принята следующая схема моделирования:

1. Прорисовка расчетной области.
2. Формирование расчетной решетки на основе метода конечных элементов.

3. Связь уравнений сохранения и граничных условий с геометрическими параметрами расчетной области.

4. Расчет гидродинамических параметров.

Пример схемы расчетной области и расчетной решетки приведены на рис. 2, 3. На рис. 2 представлена площадка АЭС:

- 1 – градирни;
- 2 – реакторы;
- 3 – вентиляционные трубы;
- 4 – лес (представляется в виде пористой среды);
- 5 – вспомогательные здания;
- 6 – трансформаторная площадка.

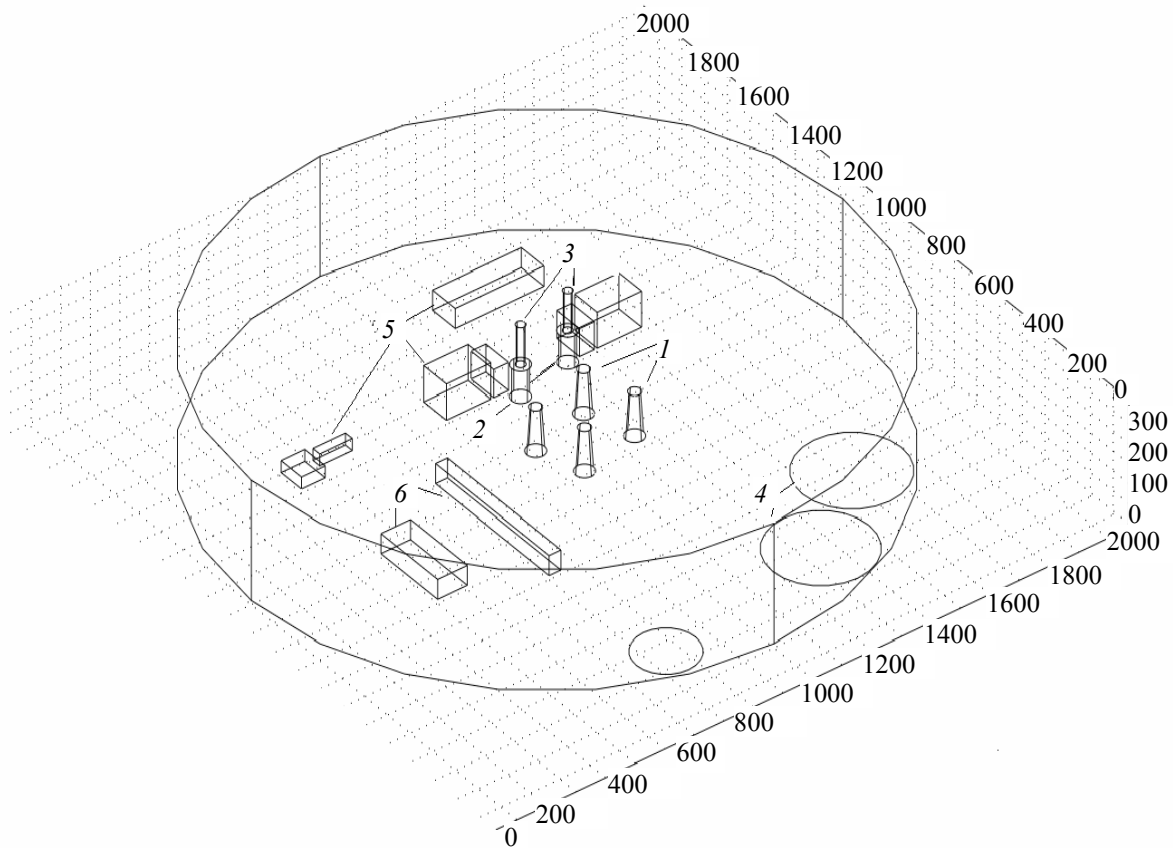


Рис. 2. Пример схемы расчетной области (площадка АЭС)

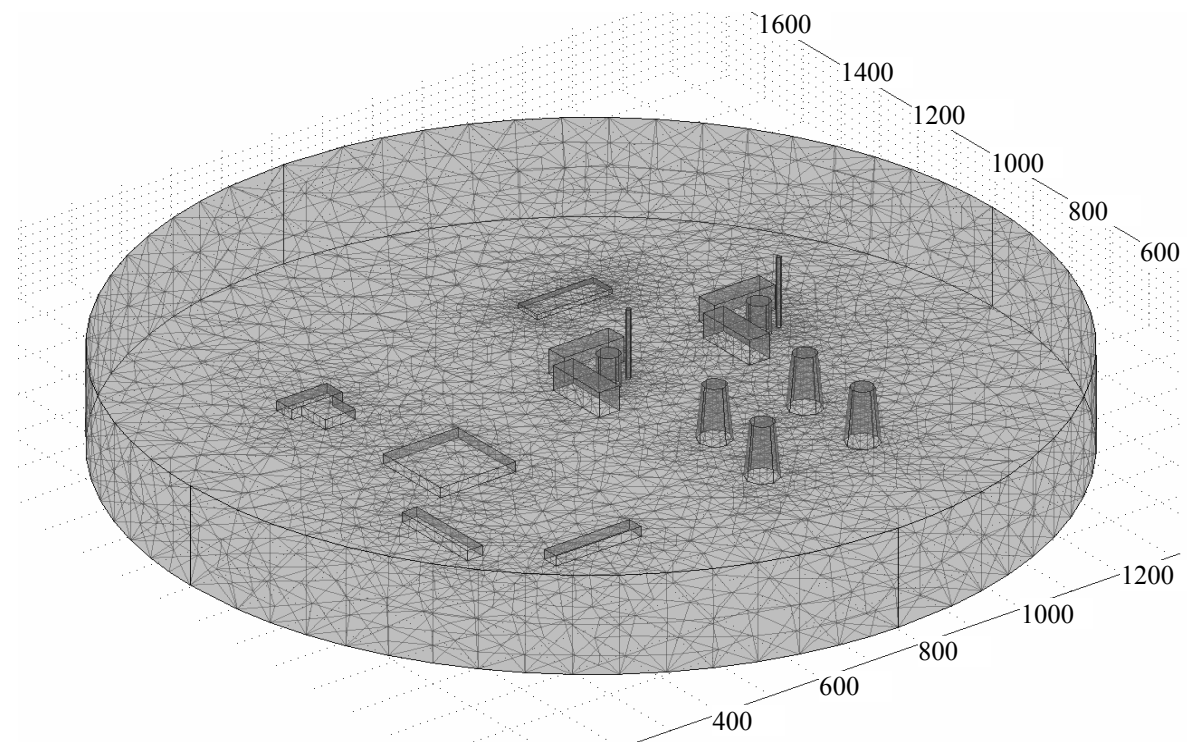


Рис. 3. Пример схемы расчетной решетки с прорисовкой элементов инфраструктуры АЭС

Плотность узлов расчетной сетки увеличивалась с приближением к объектам инфраструктуры. Размеры расчетных ячеек могут быть использованы для оценки точности моделирования. При этом предельно мини-

мальные размеры ячеек должны согласовываться с возможностями вычислительной техники.

Результаты модельных расчетов по данной схеме представлены на рис. 4, 5.

Как следует из данных рисунков, основная масса аэрозольных выбросов АЭС осажается на территории размещения и, соответственно, инфраструктуре АЭС. Это в

свою очередь приводит к необходимости анализа дозовых нагрузок и оценки риска здоровью персонала АЭС и населения на прилегающих территориях.

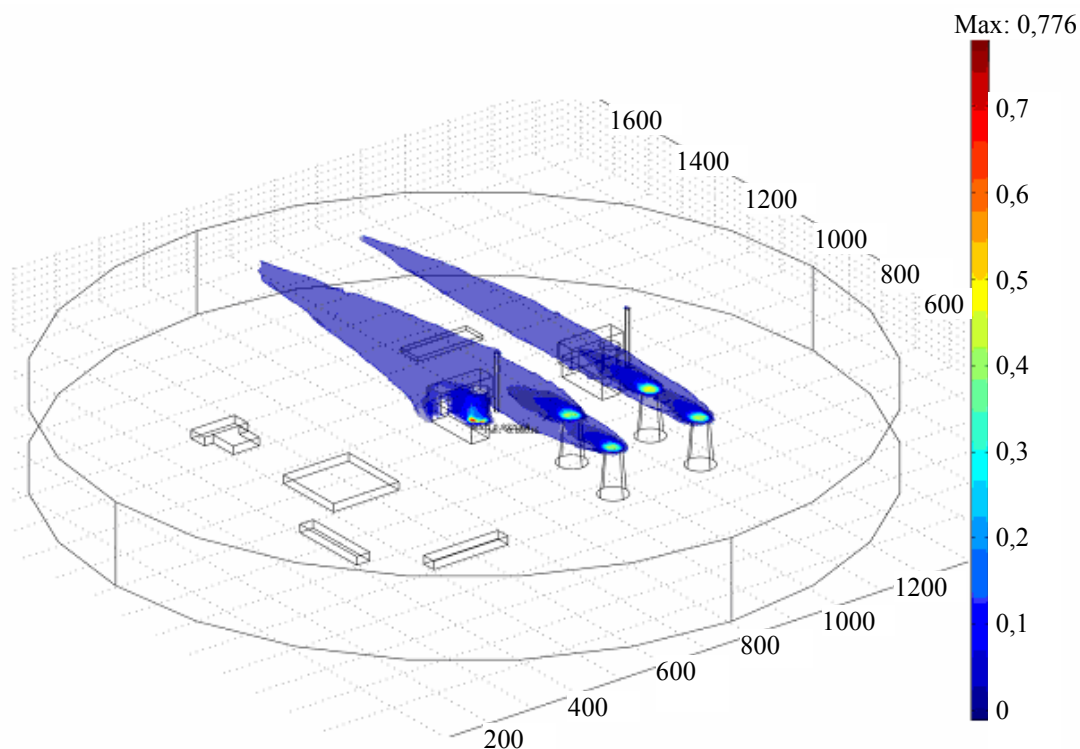


Рис. 4. Результаты расчета дисперсии канцерогенных веществ при нормальных условиях эксплуатации АЭС с углом направления ветра 90°

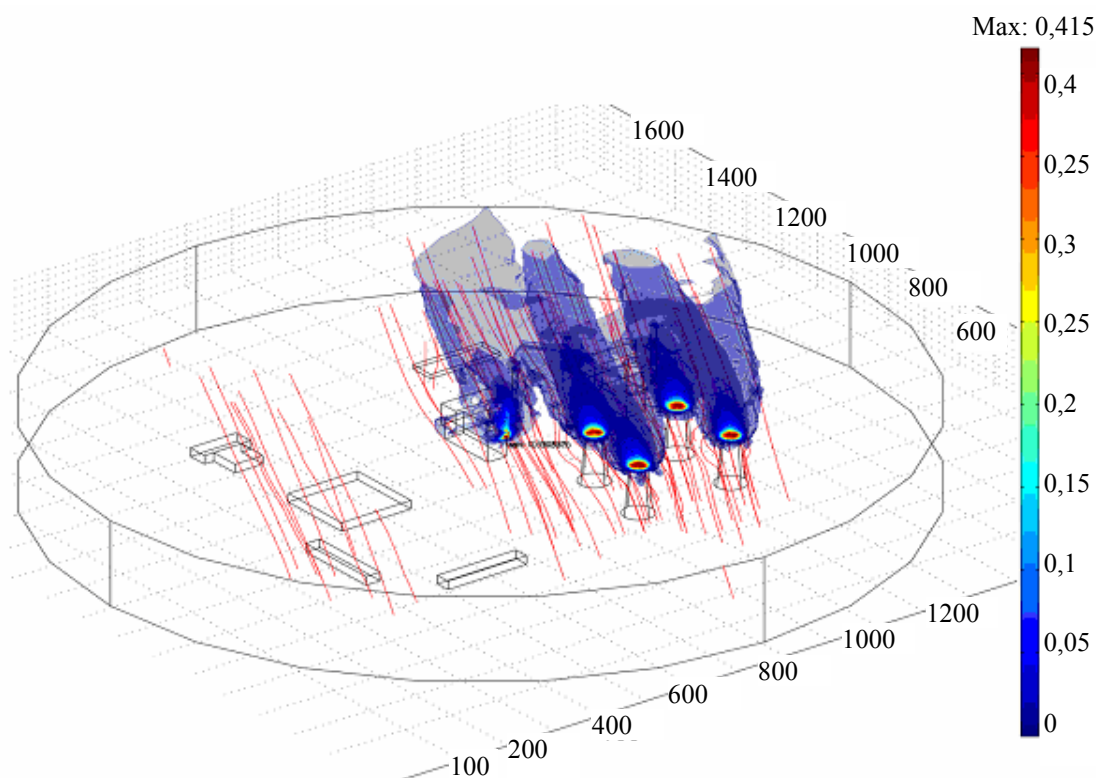


Рис. 5. Результаты расчета дисперсии канцерогенных веществ при аварийных ситуациях в работе АЭС с углом направления ветра 60°

Заключение. 1. В работе представлена модель миграции тепловых и аэрозольных выбросов АЭС на территории площадки и прилегающих территориях.

2. Разработанные программные модули можно использовать для оценки тепломассообменных процессов и распространения радиоактивности на территории площадки.

3. Метод компьютерного моделирования позволяет учесть географические и климатические особенности выбранной площадки, что заложит базу для последующего уточнения регламентов эксплуатации энергетического объекта.

4. Предлагаемая модель предназначена для программно-информационного обеспечения анализа экологической обстановки в окрестности АЭС в штатных и нештатных режимах ее работы.

5. Полученные данные предполагается в дальнейшем использовать для расчета дозовых нагрузок и оценки риска здоровью пер-

сона АЭС и населения на прилегающих территориях, а также анализа возможных климатических изменений в районе размещения АЭС.

Литература

1. Стерман, Л. С. Тепловые и атомные электрические станции: учеб. для ВУЗов / Л. С. Стерман, В. М. Ладыгин, С. Г. Тишин. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – С. 79–85.

2. Иванова, Л. А. Использование модели атмосферного пограничного слоя для расчета ветровых характеристик и оценки ветровых ресурсов / Л. А. Иванова, Е. Д. Надежина, А. В. Стеризат // Метеорология и гидрология. – 1997. – № 6. – С. 75–78.

3. Методы математического моделирования распространения радиоактивных выбросов АЭС. – Минск: ИЯЭ АН БССР, 1990. – С. 20.

Поступила 31.03.2010