

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>
УДК 621.039



Оригинальная статья

И. О. Мороз*, А. Г. Трифонов

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси, а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь*

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОДУКТОВ ДЕЛЕНИЯ И РАДИОНУКЛИДОВ ПОД ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКОЙ АЭС-2006

Аннотация. На основе международной терминологии определен и сформулирован термин «источник»: величина, представляющая физическую и химическую форму, а также учитывающая время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки. Рассмотрены химические формы продуктов деления и радионуклиды, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов. Выполнено моделирование динамики распространения источника радиоактивных веществ с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics методом LES с подсчеточной моделью Смагоринского. Получены физически не противоречивые результаты, что указывает на корректную работу модели. Создан механизм для анализа распространения многокомпонентных потоков внутри защитной оболочки АЭС-2006. Работа поможет в уточнении данных для усовершенствования модели, созданной с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования пространственного распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под защитной оболочкой АЭС-2006 при авариях с выходом радиоактивных веществ и продуктов деления.

Ключевые слова: продукты деления, термин источник, атомная электростанция, расчетный модуль, COMSOL Multiphysics, контейнер

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Мороз Ирина Олеговна – научный сотрудник научно-исследовательского отдела «Экспертный научно-технический центр Национальной академии наук Беларусь» Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларусь, e-mail: lonitkoira@gmail.com; Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Энергетическое планирование, разработки технических нормативных актов, экспертный анализ материалов и научно-организационное обеспечение Государственной программы» Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларусь, e-mail: tral@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: Мороз Ирина Олеговна – написание текста рукописи, анализ международной терминологии, рассмотрение химических форм продуктов деления и радионуклидов, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов, создание модельного аналога в COMSOL Multiphysics, формулировка выводов и интерпретация результатов; Трифонов Александр Георгиевич – постановка исследовательских целей и задач, отладка модельного аналога, формулировка выводов и интерпретация результатов, редактирование.

Для цитирования: Мороз, И. О. Анализ динамики распространения продуктов деления и радионуклидов под защитной оболочкой АЭС-2006 / И. О. Мороз, А. Г. Трифонов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук. – 2025. – Т. 70, № 4. – С. 345–352. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>

Поступила в редакцию: 26.09.2024

Доработанный вариант: 21.11.2025

Утверждена к публикации: 03.12.2025

Подписана в печать: 19.12.2025

*Original article***Irina O. Moroz*, Alexander G. Trifonov***The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus, PO box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus***ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF DISTRIBUTION OF FISSION PRODUCTS AND RADIONUCLIDES UNDER THE CONTAINMENT OF NPP-2006**

Abstract. The term “source” is defined in the article on the basis of international terminology as a value representing the physical and chemical form, as well as taking into account the time of release of fission products and other aerosols from core materials and concrete into the atmosphere of the primary containment or into the suppression pool. Chemical forms of fission products and radionuclides that can be released from the cores of modern light water reactors are considered. Modeling of the dynamics of the spread of the source of radioactive substances was simulated using the COMSOL Multiphysics software package using the LES method with the Smagorinsky subgrid model. Physically consistent results were obtained, indicating that the model functions correctly. A mechanism was developed to analyze the propagation of multicomponent flows under the containment of NPP-2006. The work will help to clarify the data needed to improve the model created using the COMSOL Multiphysics software package for simulating the spatial distribution of multicomponent gas flows and radioactive aerosols under the containment of NPP-2006 during accidents involving the release of radioactive substances and fission products.

Keywords: fission products, source term, nuclear power plant, calculation module, COMSOL Multiphysics, containment

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: Irina O. Moroz – Researcher at the Research Department “Expert Scientific and Technical Center of the National Academy of Sciences of Belarus” at Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: lonitkoira@gmail.com; Alexander G. Trifonov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory “Power Engineering Planning, Technical Regulatory Acts Drawing, Expert Analysis of Materials, and Scientific and Organizational Support for State Programme” at Joint Institute for Energy and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, e-mail: tral@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: Irina O. Moroz – writing the text of the manuscript, analysis of international therminology, consideration of the chemical forms of fission products and radionuclides that can be released from the active zones of modern light-water reactors, creation of a model analogue in COMSOL Multiphysics, formulation of conclusions and interpretation of the results; Alexander G. Trifonov – setting research goals and tasks, debugging the model analog, formulating conclusions and interpreting results, editing.

For citation: Moroz I. O., Trifonov A. G. Analysis of the dynamics of distribution of fission products and radionuclides under the containment of NPP-2006. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tehnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2025, vol. 70, no. 4, pp. 345–352 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2025-70-4-345-352>

Received: 26.09.2024

Modified: 21.11.2025

Approved for publication: 03.12.2025

Signed to the press: 19.12.2025

Введение. Концепция безопасности проектов АЭС основывается на максимальном снижении воздействия возможных аварийных выбросов на внешнюю среду. Эффективная ликвидация и максимальное снижение последствий аварийных выбросов требуют точной оценки динамики выброса и возможных трансформаций отдельных компонентов с учетом инфраструктуры и состояния внешней среды в зоне аварийного воздействия. Величину радиационных последствий определяют качественный и количественный составы радиоактивных веществ в теплоносителе первого и второго контуров.

Радиоактивность теплоносителя обусловлена наведенной активностью самого теплоносителя, а также активностью продуктов коррозии, загрязняющих его. Кроме того, радиоактивные продукты деления могут попасть в теплоноситель в случае нарушения герметичности тепловыделяющих элементов. Физические характеристики реактора, такие как плотность нейтронного потока и энергетический спектр нейтронов, а также параметры контуров циркуляции, которые зависят от конструктивных решений (например, период циркуляции теплоносителя, время его облучения и проч.), и используемые материалы конструкции также влияют на долю вклада различных источников в радиоактивность теплоносителя.

Количество продуктов деления, которое может быть выброшено из атомной электростанции в результате аварии, является фундаментальным параметром для оценки последствий аварии для людей и окружающей среды.

Нормативно-правовая среда и промышленные ожидания в разных странах различаются. Однако существует явное сходство в отношении необходимости определения эталонной величины, называемой либо «источник выброса», либо «источник в защитной оболочке».

Цель работы – сформировать понятие «источник», основываясь на международной терминологии, описать теплогидравлические процессы в активной зоне и определить основные составляющие выброса и их химические формы.

Выполнение работы поможет в уточнении данных для усовершенствования модели, созданной с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования пространственного распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под защитной оболочкой АЭС при авариях [1].

Международная терминология. Исходный термин «источник выброса» должен быть таким, чтобы у регулирующих органов и специалистов отрасли была уверенность в том, что системы защитной оболочки и связанные с безопасностью конструкции и компоненты, которые были спроектированы с использованием этого исходного термина, обеспечат приемлемый уровень безопасности. Таким образом, требуется, чтобы данный термин был репрезентативным для всех последовательностей с преобладанием риска, связанных с частичным или полным расплавлением активной зоны.

В нормативных документах Республики Беларусь нет четко сформулированного термина, применяемого в отношении выброса в пределах защитной оболочки АЭС. В Законе Республики Беларусь «О радиационной безопасности» приведен обобщенный термин «источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество либо радиационное устройство»¹.

В российской документации аналогичный термин раскрыт немного шире: «Источник ионизирующего излучения – радиоактивное вещество или устройство, испускающие или способные испускать ионизирующее излучение, на которые распространяется действие норм радиационной безопасности»².

В нормативных документах Республики Беларусь и Российской Федерации имеются термины «источник выделения загрязняющих веществ» и «источник выброса»³.

Источники выделения загрязняющих веществ – технологическое и иное оборудование, машины, механизмы, в которых происходит образование и от которых происходит выделение загрязняющих веществ, либо технологические процессы, при осуществлении которых происходят образование и выделение загрязняющих веществ⁴.

Источник выброса – это сооружение, техническое устройство, оборудование, которые выделяют в атмосферный воздух вредные вещества⁵. Следовательно, это любые объекты, которые распространяют в окружающий атмосферный воздух загрязняющие вещества, вредные для здоровья людей и природы.

В 1999 г. Международным агентством по атомной энергии был разработан технический документ IAEA-TECDOC-1127 [2], который описывает упрощенный подход для оценки источника выброса. Согласно [2], исходный термин включает в себя временные рамки, доли (фракции), состав продуктов деления, выбрасываемых в защитную оболочку во время тяжелой аварии, и их поведение во взвешенном состоянии в атмосфере защитной оболочки. Этот термин следует использовать при решении следующих задач:

- 1) определение способности контейнера к удержанию продуктов деления;
- 2) оценка внешних последствий в сопоставлении с критериями приемлемости;

¹ О радиационной безопасности: Закон Респ. Беларусь, 18 июня 2019 г., № 198-З // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=h11900198> (дата обращения: 25.06.2025).

² Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. URL: <https://www.ntcexpert.ru/documents/docs/nrb-99-2009.pdf> (дата обращения: 25.06.2025).

³ Об охране атмосферного воздуха: Федер. закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ // КонсультантПлюс. Россия: справ. правовая система. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_22971 ; О внесении изменений в Федеральный закон «Об охране атмосферного воздуха»: Федер. закон от 13 июня 2023 г. № 255-ФЗ // Там же. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_449482 ; Об охране атмосферного воздуха: Закон Респ. Беларусь 16 дек. 2008 г. № 2-З // ЭТАЛОН: информ.-поисковая система. URL: <https://etalonline.by/document/?regnum=H10800002> (дата обращения: 25.06.2025).

⁴ Об охране атмосферного воздуха: Закон Респ. Беларусь от 16 дек. 2008 г. № 2-З.

⁵ Об охране атмосферного воздуха: Федер. закон от 4 мая 1999 г. № 96-ФЗ.

- 3) проектирование некоторых систем защитной оболочки;
- 4) проведение экологической экспертизы и оценки живучести ключевых компонентов;
- 5) обеспечение адекватной защиты от прямого излучения для персонала в блочном щите управления (БЩУ) и в других местах, куда имеется доступ.

Термин «источник» будем принимать как некую величину, представляющую физическую и химическую форму, а также учитывающую время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки. Таким образом, источник представляет собой материал, который выбрасывается в защитную оболочку как из контура теплоносителя реактора, так и из источников вне корпуса.

В свою очередь источник в защитной оболочке – это переносимая по воздуху радиоактивность и ее физико-химическая форма в атмосфере первичной защитной оболочки в зависимости от времени. Таким образом, данный термин представляет собой радиоактивность, которая может быть высвобождена из первичной защитной оболочки, и ее поведение в защитной оболочке.

Важнейшим барьером на пути выхода продуктов деления в окружающую среду является защитная оболочка. Для смягчения последствий тяжелых аварий важно, чтобы защитная оболочка сохраняла свою способность служить эффективным барьером. Активности продуктов деления в защитной оболочке и эффективность систем безопасности должны приводить к приемлемым радиологическим последствиям, как определено в [3] для станций нового поколения.

Химический состав. Химические формы продуктов деления и радионуклиды, которые могут выделяться из активных зон современных легководных реакторов, должны быть аналогичны тем, которые применимы к существующим легководным реакторам. В [4] приведены данные об измеренной активности некоторых радионуклидов в теплоносителе реактора типа ВВЭР-440 и их вкладе в дозу. Анализируя эти данные, стоит обратить внимание на следующие вносящие большой вклад в дозу радионуклиды: ^{110m}Ag , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{54}Mn . Вклад изотопа ^{16}N в активность теплоносителя, который образуется в реакторе в результате активации кислорода в воде быстрым потоком нейтронов ($^{16}\text{O}(\text{n},\text{p})\ ^{16}\text{N}$), является основным источником γ -излучения в первом контуре реактора.

Активность теплоносителя первого контура обусловлена продуктами деления, активации и коррозии.

Продукты деления. Стабильные и некоторые радиоактивные продукты деления, находясь в поле нейтронов работающего реактора, захватывают тепловые нейтроны, образуя новые радионуклиды и новые радиоактивные цепочки. В зависимости от физико-химического состояния и особенностей поведения в технологических системах АЭС и окружающей среде продукты деления классифицируются следующим образом [5]:

- 1) благородные газы (аргон, криpton, ксенон);
- 2) летучие/слаболетучие вещества (йод, цезий);
- 3) тритий и углерод;
- 4) нелетучие вещества (лантан, стронций, рубидий и др.).

Продукты активации. Нейтронное облучение некоторой части оборудования контура вызывает образование и накопление радиоактивных продуктов неосколочного происхождения. На АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой высокой степени очистки, основная активность теплоносителя образуется в результате активации кислорода воды. При этом образуются радионуклиды ^{16}N , ^{13}N , ^{18}F , которые являются β - и γ -излучателями. Кроме того, возможна активация примесей, недостаточно полно удаленных в процессе водоподготовки. Это изотопы ^{23}Na , ^{41}K , ^{27}Al , ^{40}Ar [5].

Продукты коррозии. Весьма важным источником активности теплоносителя всех реакторов являются продукты коррозии. Данные радионуклиды образуются в материалах активной зоны, внутрикорпусных устройств, в теплоносителе первого контура, и их перечень определяется преимущественно элементным составом материалов, контактирующих с теплоносителем первого контура. Основная доля радионуклидов, определяющих радиационную обстановку за счет отло-

жений продуктов коррозии на внутренних поверхностях контура, приходится на изотопы ^{51}Cr , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{58}Co , ^{59}Fe .

Все внутрикорпусные устройства, находящиеся в поле нейтронов, сохраняют длительное время наведенную активность и представляют собой источники повышенной опасности при демонтаже, обслуживании и ремонте [5].

Радионуклиды, которые могут оказывать значимое воздействие на окружающую среду при работе АЭС и других предприятий ядерного топливного цикла, принято называть биологически значимыми радионуклидами. При нормальной работе АЭС к группе биологически значимых газообразных нуклидов относят те, период полураспада которых превышает несколько минут. С точки зрения радиационной опасности для персонала АЭС и населения, кроме нуклидов криптона, ксенона и йода, наибольшее значение имеют радионуклиды ^{89}Sr , ^{90}Sr , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{95}Zr , ^{95}Nb , ^{144}Ce и др.

К наиболее распространенным и биологически значимым для человека и живой природы радионуклидам техногенного происхождения (с точки зрения оценки опасности) специалисты относят ^{137}Cs . Для этого нуклида характерны высокий выход при делении ^{235}U и период полу-распада, соизмеримый с продолжительностью жизни человека (30,05 лет) [6]. При распаде ^{137}Cs образуются электроны с энергиями до 1,17 МэВ и γ -кванты в основном с энергией 662 кэВ. Таким образом, ^{137}Cs со своим дочерним изотопом может создавать дозы как внешнего, так и внутреннего облучения различных объектов. Совокупность перечисленных характеристик этого радионуклида обуславливает его выбор в качестве реперного [6].

Моделирование аварийного сценария. Для анализа динамики распространения радиоактивных веществ используются математические модели, основанные на уравнениях конвекции, диффузии и реакционной способности и проч. [7].

Главной задачей при моделировании реальных процессов является решение мультифизической задачи, сочетающей несколько взаимосвязанных физических процессов в одной модели. Используя моделирование на основе уравнений, можно работать с функциями, содержащими общие переменные. При этом средства моделирования предоставляют возможность вносить любые изменения в набор и настройки используемых в расчете модулей (режимов).

Моделирование проводилось с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics, имеющего несколько режимов. Каждый режим соответствует определенному физическому процессу (например, теплопередаче) или набору уравнений (к примеру, уравнения Навье–Стокса). После определения геометрии необходимо выбрать режим моделирования и задать в полях редактирования свойства материалов и ограничения. Для моделирования нескольких физических процессов достаточно выбрать дополнительные режимы и добавить их к уже существующим режимам.

Модули COMSOL Multiphysics предоставляют дополнительные режимы моделирования и удобную рабочую среду. Модули используют стандартную терминологию, библиотеки материалов, специализированные решатели и графические инструменты – в соответствии с областью применения. В то же время модули полностью интегрируются с COMSOL Multiphysics и друг с другом.

При различных категориях аварий выбрасываются преимущественно йод и цезий в виде аэрозольных частиц размером до 1 мм. Процесс осаждения радиоактивных веществ на характерные поверхности внутри АЭС зависит также и от состояния шероховатости и наличия смоченной поверхности. Предполагается, что в случае образования смоченной поверхности все аэрозольные частицы осядут на нее. Эффективность осаждения аэрозолей на твердой поверхности определяется структурой потока и свойствами аэрозоля.

Расчетная оценка начинается с определения сценария аварии. Авторами был рассмотрен сценарий с потерей теплоносителя первого контура. Данное событие может привести к расплавлению топлива и выбросу продуктов деления.

Для моделирования этого процесса, как правило, используются математические модели, учитывающие направление и скорость выброса; температурные градиенты; конфигурацию реакторного зала и защитной оболочки; наличие физических препятствий.

В данной работе в рамках формализованных шаблонов программного пакета COMSOL Multiphysics для моделирования были использованы следующие модули¹:

Heat Transfer in Fluids (ht) – теплопередача в жидкостях. Используется для моделирования теплопередачи в жидкостях посредством проводимости, конвекции и излучения;

Transport of Diluted Species (tds) – перенос разбавленных веществ. Применяется для расчета поля концентрации разбавленного растворенного вещества в растворителе. Транспорт и реакции веществ, растворенных в газе, жидкости или твердом теле, могут обрабатываться с помощью этого интерфейса. Движущими силами для транспорта могут быть диффузия по закону Фика, конвекция в сочетании с полем потока и миграция в сочетании с электрическим полем;

LES Smagorinsky (spf). Уравнения, решаемые интерфейсом LES Smagorinsky, представляют собой уравнение непрерывности для сохранения массы и уравнение Навье–Стокса, дополненное членом турбулентной вязкости.

Динамика распространения источника радиоактивных веществ. В рамках исследования авторами рассмотрена авария с потерей теплоносителя первого контура. Геометрические размеры расчетной области соответствовали проектным характеристикам реакторов типа ВВЭР-1200. В расчетную область включены основные элементы гермообъема. При расчете также учитывался теплосъем через систему пассивного отвода тепла из-под защитной оболочки. Задавались следующие параметры: диаметр течи – 50 мм, начальная температура истекающей жидкости – 400 К, максимальная скорость выброса – 15,8 м/с, давление внутри защитной оболочки – 101 325 Па.

Принятый нами термин «источник» учитывает физические и химические формы продуктов деления и радионуклидов, которые могут выделяться из активной зоны реактора. Следовательно, при моделировании процессов, протекающих внутри защитной оболочки при авариях, важно учитывать не только характеристики и свойства парогазового потока, но и присутствующие в нем продукты деления, активации и коррозии и их физико-химические свойства. В качестве одного из условий моделируемой аварии в замкнутом пространстве под оболочкой АЭС рассматривался многокомпонентный газовый поток с примесью аэрозольных частиц. Относительная концентрация компонентов принята следующей: водород – 5 %, водяной пар – 85 %, инертные газы – 6 % криптона и 4 % ксенона. Скорость осаждения аэрозольных частиц принята равной 0,02 м/с.

В результате численного моделирования системы уравнений многомерных уравнений сохранения и учета замыкающих соотношений для компонентов смеси получены газодинамические характеристики турбулентного потока в замкнутом объеме.

На рис. 1 отображено пространственное распространение относительной концентрации аэрозольных частиц и область их осаждения, время расчета – 300 с после начала аварии. На рис. 2 представлены результаты пространственного распределения относительной концентрации водяного пара и водорода. Красными линиями на рисунке обозначено направление поля скоростей. Время расчета составило 2000 с.

Анализируя полученные результаты численного моделирования, можно отметить следующее: несмотря на достаточно высокую максимальную горизонтальную скорость в первые секунды струйного выброса, регистрируется подъем компонента водорода сразу вверх, а не вдоль начального направления. Такой эффект фиксируется и в ряде экспериментальных наблюдений. С увеличением времени моделирования наблюдается стратификация компонентов газовой смеси. Водород как наиболее легкий газовый компонент скапливается преимущественно в верхней части оболочки. Было установлено, что на относительно высоких скоростях истечения газового потока приемлемая сходимость численных результатов достигалась только при использовании метода LES с подсеточной моделью Смагоринского. Осаждение аэрозольных частиц происходило на всех поверхностях, находящихся на пути движения потока.

На основе анализа полученных физически непротиворечивых данных можно сделать вывод, что результаты данного исследования могут служить основой для дальнейшего совершенство-

¹ User's Guide COMSOL Multiphysics. URL: <https://doc.comsol.com/6.3/docserver/#!com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html> (date of access: 03.02.2025).

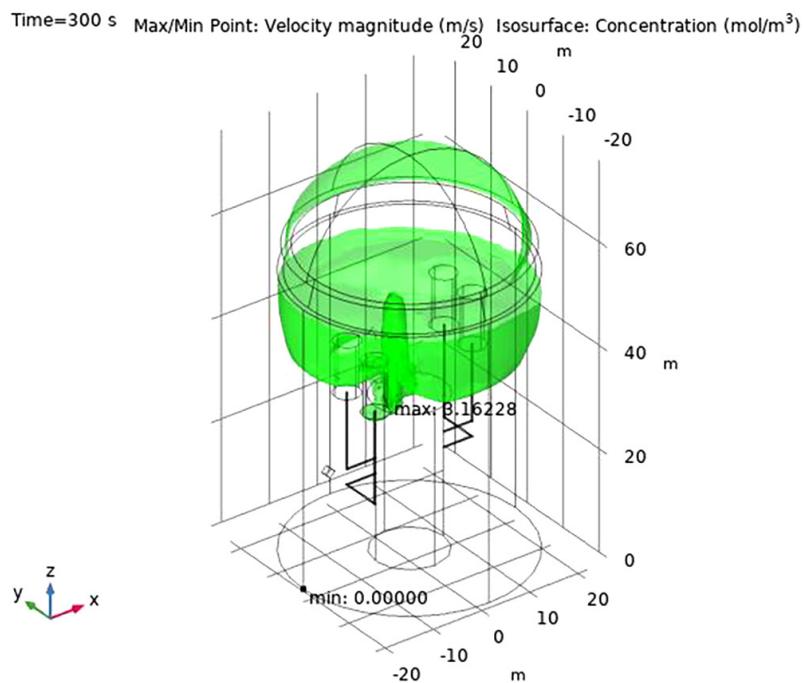


Рис. 1. Пространственное распределение относительной концентрации аэрозольных частиц
 Fig. 1. Spatial distribution of the relative concentration of aerosol particles

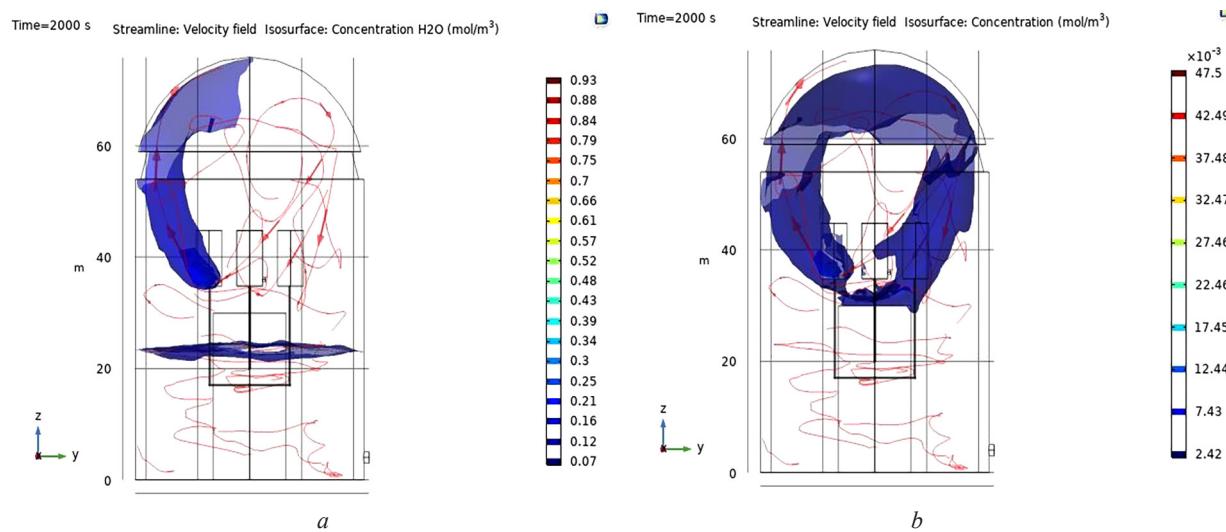


Рис. 2. Пространственное распределение относительной концентрации водяного пара (а) и водорода (б).
 Время расчета – 2000 с

Fig. 2. Spatial distribution of relative concentration of water vapor (a) and hydrogen (b).
 Time of calculation – 2000 s

вания предложенной модели и программных модулей для анализа аварийных ситуаций на современных АЭС. Разработанный механизм моделирования движения многокомпонентных газов и аэрозолей внутри защитной оболочки АЭС-2006 позволит улучшить существующие модели и повысить безопасность реакторов.

Заключение. Исходя из нормативных документов термин «источник» определен как величина, представляющая физическую и химическую форму, а также учитывающая время выброса продуктов деления и других аэрозолей из материалов активной зоны и бетона в атмосферу первичной защитной оболочки или в бассейн выдержки.

Химические формы продуктов деления, которые могут выбрасываться из активной зоны реактора, для будущих конструкций, вероятно, будут такими же, как и для нынешних конструк-

ций активной зоны. Все продукты деления должны быть сконденсированы до входа в атмосферу защитной оболочки, за исключением инертных газов и небольшой доли йода. Таким образом, для получения члена источника в защитной оболочке все неблагородные газы и продукты деления в атмосфере первичной защитной оболочки можно считать присутствующими в виде аэрозолей.

В ходе работы выполнено моделирование турбулентного газового потока в гермообъеме с использованием программного пакета COMSOL Multiphysics методом LES с подсеточной моделью Смагоринского. Получены физически непротиворечивые результаты, что указывает на корректную работу модели. Создан механизм для анализа распространения многокомпонентных потоков внутри защитной оболочки АЭС. Теплогидравлические алгоритмы необходимо использовать вместе с автономной моделью продуктов деления или аэрозоля для прогнозирования выброса из активной зоны.

Не существует уникальной последовательности, которая приводит к ограничению выброса продуктов деления. В случае выброса в защитную оболочку продуктов деления и их поведения в защитной оболочке предложен разумно ограничивающий метод. Численные значения не приводятся, но принят параметрический подход, который позволит оценить исходный термин «источник» в защитной оболочке.

Список используемых источников

1. Мороз, И. О. Моделирование распространения многокомпонентных потоков газов и радиоактивных аэрозолей под оболочкой АЭС / И. О. Мороз, А. Г. Трифонов // XVI Минский международный форум по тепло- и массообмену: тез. докл. и сообщений. – Минск, 2022. – С. 408–412.
2. A simplified approach to estimating reference source terms for LWR designs: IAEA-TECDOC-1127. – Vienna: IAEA, 1999. – 73 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1127_prn.pdf
3. Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-801. – Vienna: IAEA, 1995. – 64 p. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_801_web.pdf
4. Воронин, Л. М. Некоторые вопросы радиационной безопасности АЭС с ВВЭР-440 / Л. М. Воронин, А. П. Волков, В. Ф. Козлов // Атомная энергия. – 1976. – Т. 41, вып. 4. – С. 235–238.
5. Характеристика продуктов аварии при радиоактивном загрязнении местности при авариях на АЭС и других РОО / П. В. Данилов, К. В. Жиганов, А. В. Пронин, Е. С. Титова // Молодой ученый. – 2017. – № 15 (149). – С. 35–38.
6. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома / под общ. ред. И. И. Линге, И. И. Крышева. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
7. Жуков, В. Т. Математическая модель течения многокомпонентной смеси газов с учетом возможности возникновения жидкой фазы / В. Т. Жуков, Ю. Г. Рыков, О. Б. Феодоритова. – М.: Ин-т приклад. математики им. М. В. Келдыша, 2018. – 36 с. – (Препринт/ ИПМ им. М. В. Келдыша. 2018. № 183).

References

- 1 Moroz I. O., Trifonov A. G. Modeling of the distribution of multicomponent flows of gases and radioactive aerosols under the NPP shell. *XVI Minskii mezhdunarodnyi forum po teplo- i massoobmenu Tezisy dokladov i soobshchenii dopolnitel'noe izdanie* [XVI Minsk International Forum on Heat and Mass Transfer: Abstracts of Reports and Messages]. Minsk, 2022, pp. 408–412 (in Russian).
- 2 IAEA. *A simplified approach to estimating reference source terms for LWR designs: IAEA-TECDOC-1127*. Vienna, 1999. 73 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1127_prn.pdf
- 3 IAEA. *Development of Safety Principles for the Design of Future Nuclear Power Plants: IAEA-TECDOC-801*. Vienna, 1995. 64 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_801_web.pdf
- 4 Voronin L. M., Volkov A. P., Kozlov V. F. Problems of radiation safety in nuclear power stations containing VVER-440 reactors. *Atomic Energy*, 1976, vol. 41, iss. 4, pp. 867–870. <https://doi.org/10.1007/bf01118775>
- 5 Danilov P. V., Zhiganov K. V., Pronin A. V., Titova E. S. Characteristics of accident products during radioactive contamination of the area during accidents at nuclear power plants and others RHO. *Molodoi uchenyi* [Young Scientist], 2017, no. 15 (149), pp. 35–38 (in Russian).
- 6 Linge I. I., Kryshev I. I. (eds.). *Radioecological Situation in the Regions where Rosatom Enterprises are Located*. Moscow, SAM poligrafist Publ., 2015. 296 p. (in Russian).
- 7 Zhukov V. T., Rykov Yu. G., Feodoritova O. B. *Mathematical Model of the Flow of a Multicomponent Mixture of Gases, Taking into Account the Possibility of the Emergence of a Liquid Phase*. Moscow, Keldysh Institute of Applied Mathematics, 2018. 36 p. (in Russian).