



ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА

№ 3, 2015

PNRPU MECHANICS BULLETIN

<http://vestnik.pstu.ru/mechanics/about/inf/>



DOI: 10.15593/perm.mech/2015.3.01

УДК 539.3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ ВНУТРИ КОРПУСА РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ

В.Г. Баженов¹, М.Н. Жестков¹, В.А. Замятин², А.И. Кибец¹

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород, Россия

О СТАТЬЕ

Получена: 15 июня 2015 г.

Принята: 15 июля 2015 г.

Опубликована: 30 сентября 2015 г.

Ключевые слова:

реактор, запроектная авария, гидродинамическое давление, метод конечных элементов, прочность

АННОТАЦИЯ

В трехмерной постановке рассматривается процесс нестационарного деформирования конструкции реактора на быстрых нейтронах с жидким теплоносителем в условиях постулируемой запроектной аварии типа ULOF (Unprotected Loss of Flow). Под этой аварией понимается расплавление активной зоны, вызванное отключением главных циркуляционных насосов первого контура с сопутствующим несрабатыванием аварийной защиты. В результате расплавления активной зоны реактора образуется область энерговыделения с повышенным уровнем давления, заполненная парами натрия. Прогрессирующее расширение области энерговыделения в теплоносителе приводит к росту уровня напряженно-деформированного состояния корпуса реактора и может привести к его разрушению. В этих условиях реакторная установка должна сохранять герметичность, обеспечивать локализацию последствий запроектной аварии внутри силового корпуса и не допускать опасного радиационного воздействия на персонал атомной станции и окружающую среду.

Для описания движения теплоносителя и конструктивных элементов реактора применяется текущая лагранжевая формулировка. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей. В качестве физических соотношений для металлов применяются уравнения теории пластического течения. В теплоносителе девиаторные компоненты напряжений полагаются равными нулю, а связь между гидростатическим давлением и плотностью берется в виде уравнения состояния квазиакустического типа. Контакт теплоносителя с конструктивными элементами реактора моделируется условиями непроникания. Решение задачи основывается на моментной схеме метода конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест», реализованных в рамках вычислительной системы «Динамика-3».

Численно исследуется изменение напряженно-деформированного состояния корпуса реактора на быстрых нейтронах в условиях запроектной аварии типа ULOF. Анализируется возможность локализации последствий запроектной аварии внутри силового корпуса реактора.

© ПНИПУ

© **Баженов Валентин Георгиевич** – доктор физико-математических наук, профессор, bazhenov@mech.unn.ru.

Жестков Максим Николаевич – аспирант, e-mail: zhestkov@mail.ru.

Замятин Владимир Аркадьевич – кандидат технических наук, начальник бюро, e-mail: silaev@okbm.nnov.ru.

Кибец Александр Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, e-mail: kibec@mech.unn.ru.

Valentin G. Bazhenov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, bazhenov@mech.unn.ru

Maxim N. Zhestkov – Postgraduate Student, e-mail: zhestkov@mail.ru

Vladimir A. Zamyatin – PhD in Technical Sciences, Head of Design Department, e-mail: silaev@okbm.nnov.ru

Alexander I. Kibets – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, e-mail: kibec@mech.unn.ru

MATHEMATICAL MODELING OF DEVELOPMENT OF BEYOND DESIGN BASIS ACCIDENT IN INTEGRAL FAST-NEUTRON REACTORS VESSEL

V.G. Bazhenov¹, M.N. Zhestkov¹, V.A. Zamyatin², A.I. Kibets¹

¹ Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

² JSC "Afrikantov OKBM", Nizhni Novgorod, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 15 June 2015
Accepted: 15 July 2015
Published: 30 September 2015

Keywords:

reactor, beyond the design basis accident, hydraulic pressure, finite element method, strength

ABSTRACT

The process of nonstationary deformation of construction of the fast reactor with liquid metal coolant under postulated ULOF beyond design basis accident is examined. This type of accident includes core melting caused by disconnection of the main circulation pump arrangements of the primary circuit with the associated failure of the emergency protection. As a result of core melting, the area with a high energy level pressure is created. It is filled with sodium vapor. The progressive expansion of the energy area in the coolant leads to an increase of stress-strain state level of the reactor vessel and may lead to its destruction. The reactor facility must save integrity, provide localization of consequences of beyond design basis accident inside of the pressure vessel and avoid dangerous radiation effects on personnel of nuclear power station and the environment in these conditions.

Current Lagrangian formulation is used for the description of coolant motion and structural elements of the reactor. The equation of motion derives from the balance of virtual capacity. Equations of the theory plastic flow are used in physical relations for metals. Deviatoric stress components are assumed to be equal to zero in the coolant; and the equation between hydrostatic pressure and density is taken as a state equation of quasiacoustic type. The contact between the coolant with structural elements of the reactor is simulated by the conditions of non-penetration. The problem solution is based on the method of moment schema of FEM and explicit finite-difference time integration scheme of the "cross" which are implemented in the computing system "Dynamics 3".

The deformation of the fast reactor vessel is investigated numerically in the ULOF beyond design basis accident. The possibility of localizing effects consequences of beyond design basis accident inside of the pressure vessel of the reactor is analyzed.

© PNRPU

Оценка радиационной безопасности окружающей среды и здоровья человека является одним из ведущих факторов, определяющих перспективы развития ядерной энергетики [1–4]. В соответствии с нормативными документами [5] неотъемлемой частью обоснования безопасности любой атомной станции (АС) является анализ запроектных аварий (ЗА). В частности, энергетический сценарий развития запроектной аварии ULOF [6, 7] предусматривает обесточивание АС с потерей источников энергоснабжения, включая резервные, с одновременным несрабатыванием всех средств воздействия на реактивность. В этих условиях конструкции интегральных реакторов на быстрых нейтронах типа БН должны обеспечивать герметичность силового корпуса.

Запроектная авария характеризуется образованием в активной зоне реактора зоны энерговыделения (ЗЭ) с повышенным уровнем давления, заполненной парами натрия. От зоны энерговыделения начинают распространяться волны сжатия, способные вызвать большие смещения теплоносителя, упругопластические деформации или разрушения в конструктивных элементах реактора. Важнейшим аспектом обеспечения безопасности в рассматриваемой аварийной ситуации становится анализ динамической прочности корпуса реактора и внутриреакторного оборудования при их взаимодействии с теплоносителем. Методы и программные коды для моделирования теплофизических явлений в ядерных энергетических установках изложены в [7–11]. Ниже приводятся методика и результаты численного решения трехмерной задачи упругопластического деформирования корпуса реактора на быстрых нейтронах при гидродинамических воздействиях в условиях запроектной аварии ULOF.

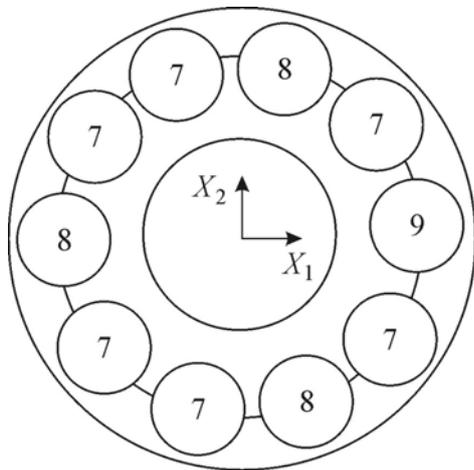


Рис. 1. Расчетная схема (вид сверху)

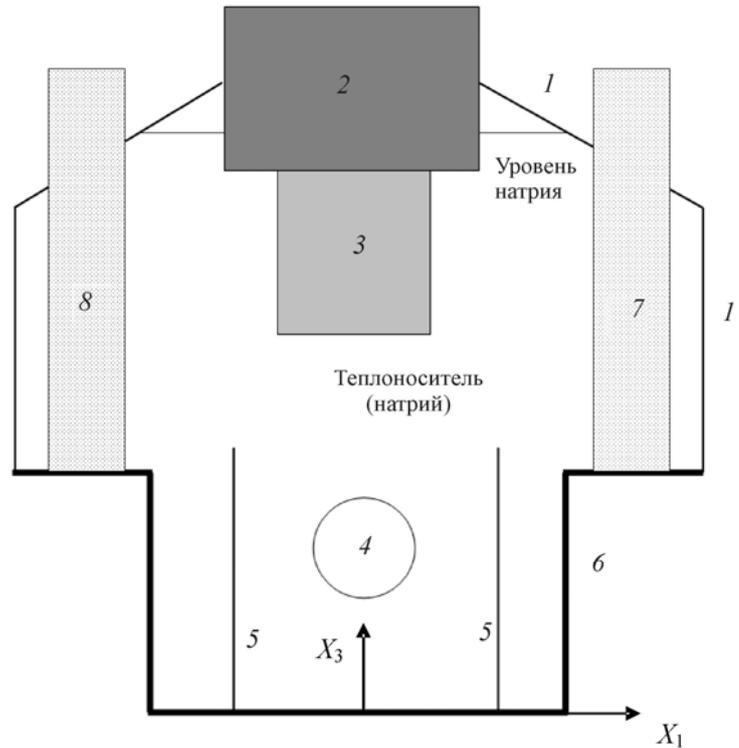


Рис. 2. Расчетная схема (вид сбоку)

Расчетная схема реактора типа БН представлена на рис. 1, 2, где цифрами обозначены: 1 – корпус реактора; 2 – большая поворотная пробка; 3 – центральная колонна; 4 – зона энерговыделения (ЗЭ); 5 – отражатель нейтронов; 6 – опорный пояс; 7 – промежуточный теплообменник (ПТО); 8 – главный циркуляционный насос (ГЦН); 9 – элеватор. Элементы конструкции реактора выполнены из стали 08Х18Н9, физико-механические свойства которой при температуре 450 °С приведены в [6]. Предполагалось, что момент времени $t = 0$ соответствует завершению фазы разгона реактора и образованию сферической зоны энерговыделения. Источник энерговыделения располагался в центре активной зоны. Изменение во времени давления P в зоне энерговыделения, рассчитанное с учетом теплообмена с холодными металлоконструкциями корпуса, представлено на рис. 3, где $P_0 = 3$ МПа – максимальное значение давления [6].

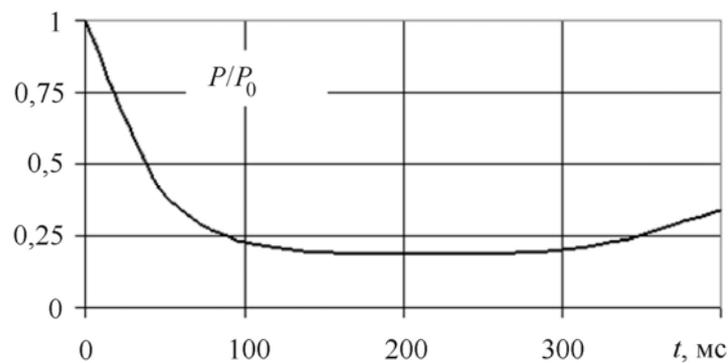


Рис. 3. Зависимость давления в теплоносителе на границе зоны энерговыделения от времени

Для описания движения конструкции реактора и теплоносителя применяется текущая лагранжевая формулировка [12–14]. Уравнение движения выводится из баланса виртуальных мощностей [12, 13]:

$$\int_{\Omega} \sigma_{ij} \delta \dot{\varepsilon}_{ij} dV + \int_{\Omega} \rho \ddot{U}_i \delta \dot{U}_i dV = \int_{\Gamma_p} P_i \delta \dot{U}_i d\gamma + \int_{\Gamma_q} P_i^q \delta \dot{U}_i d\gamma \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad (1)$$

где \dot{U}_i – компоненты вектора скорости перемещения в общей декартовой системе координат X ; σ_{ij} , $\dot{\varepsilon}_{ij}$ – компоненты тензоров напряжений Коши и скоростей деформаций (симметричной части градиента скорости перемещений); ρ – плотность; P_i^q – контактное давление на границе Γ_q взаимодействия теплоносителя и конструктивных элементов реактора; P_i – нагрузка, распределенная на поверхности зоны энерговыделения Γ_p ; Ω – исследуемая область (теплоноситель, корпус реактора и внутрореакторное оборудование); $\delta \dot{\varepsilon}_{ij}$, $\delta \dot{U}_i$ – вариации $\dot{\varepsilon}_{ij}$, \dot{U}_i (на поверхности с заданными кинематическими граничными условиями $\delta \dot{U}_i = 0$); точка над символом означает частную производную по времени t ; по повторяющимся индексам ведется суммирование. Компоненты тензора скорости деформаций определяются в метрике текущего состояния:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = (\dot{U}_{i,j} + \dot{U}_{j,i})/2 \quad (i, j = \overline{1, 3}), \quad \dot{U}_{i,j} = \partial \dot{U}_i / \partial X_j, \quad X_i = X_i|_{t=0} + \int_0^t \dot{U}_i dt. \quad (2)$$

В качестве физических соотношений для металлов применяются уравнения теории пластического течения [15, 16].

$$\begin{aligned} \sigma'_{ij} &= \sigma_{ij} + \sigma^V \delta_{ij}, \quad \dot{\sigma}^V = -3K \dot{\varepsilon}^V, \quad \dot{\varepsilon}^V = \dot{\varepsilon}_{ii} / 3, \\ \dot{\varepsilon}'_{ij} &= \dot{\varepsilon}_{ij} - \dot{\varepsilon}^V \delta_{ij} - \dot{\varepsilon}_{ij}^p, \quad \dot{\varepsilon}_{ii}^p = 0, \quad D_j \sigma'_{ij} = 2G \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^e, \\ \dot{\varepsilon}_{ij}^p &= \dot{\lambda} \partial f / \partial \sigma'_{ij}, \quad f = \sigma'_{ij} \sigma'_{ij} - \frac{2}{3} \sigma_{\tau}^2 = 0; \quad \sigma_{\tau} = \sigma_{\tau}(\chi), \quad \chi = \sqrt{\frac{2}{3}} \int_0^t \sqrt{\dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p \dot{\varepsilon}'_{ij}{}^p} dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь σ'_{ij} , $\dot{\varepsilon}'_{ij}$, σ^V , $\dot{\varepsilon}^V$ – девиаторные и шаровые компоненты тензоров напряжения и скоростей деформаций; $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ – скорости пластических деформаций; G , K – модули сдвига и объемного сжатия; δ_{ij} – символы Кронекера; D_j – производная Яуманна [17]: $D_j \sigma'_{ij} = \dot{\sigma}'_{ij} - \sigma'_{ik} W_{kj} - \sigma'_{jk} W_{ik}$, где $W_{ij} = (\dot{U}_{i,j} - \dot{U}_{j,i})/2$; f – поверхность текучести Мизеса; σ_{τ} – динамический предел текучести; $\dot{\lambda}$ – параметр, тождественно равный нулю при упругом деформировании и определяемый при упругопластическом деформировании из условия прохождения мгновенной поверхности текучести через конец вектора догрузки.

В настоящей работе исследуется нестационарная стадия запроектной аварии, характеризующаяся максимальным уровнем давления в зоне энерговыделения. Длительность нестационарной стадии, по данным численного решения задачи в осесимметричной постановке [6], составляет примерно 10 мс. Отклонение температуры от 450 °С незначительно. Скорость деформаций в конструктивных элементах реактора не превышает 10 с⁻¹. Поэтому влияние изменения скорости деформаций и температуры на деформационные характеристики материала не учитывается.

Теплоноситель моделируется как жидкая среда, в которой девиаторные компоненты напряжений полагаются равными нулю, а связь между гидростатическим давлением и плотностью берется в виде уравнения состояния квазиакустического типа [6].

Контакт между теплоносителем и конструктивными элементами реактора моделировался условиями непроникания по нормали и свободного скольжения вдоль касательной к поверхности контакта [18]:

$$\dot{u}_n^1 = \dot{u}_n^2, \quad q_n^1 = -q_n^2, \quad q_i^1 = q_i^2 = 0, \quad i = \tau_1, \tau_2. \quad (4)$$

Здесь n, τ_1, τ_2 – единичные векторы локального, ортогонального базиса; n – вектор нормали к поверхности контакта; τ_1, τ_2 ортогональны n ; нижний индекс i означает проекцию вектора на оси подвижной системы координат, верхними индексами 1 и 2 обозначены номера соответствующих подобластей, поверхности которых находятся в контакте. Связь контактирующих подобластей полагается односторонней, т.е. возможен отрыв поверхностей друг от друга и повторное вступление в контакт. Поэтому условия (4) применяются только для сжимающих сил $(q_n^i, n^i) < 0$. Система уравнений (1)–(4) дополняется начальными условиями и кинематическими граничными условиями.

Решение трехмерной нелинейной задачи динамики основано на методе конечных элементов и явной конечно-разностной схеме интегрирования по времени типа «крест» [16, 18–21]. Деформируемая конструкция заменяется лагранжевой сеткой, состоящей из 8-узловых конечных элементов (КЭ). В узлах сетки определяются ускорения $\{\ddot{U}\}$, скорости $\{\dot{U}\}$ и перемещения $\{U\}$ в общей системе координат $\{X\} = \{X_1 X_2 X_3\}^T$. Предполагается, что в конечных элементах сдвиговые и изгибные деформации малы, а смещения и углы поворота КЭ как жесткого целого произвольны. В каждом конечном элементе вводится локальный базис $\{x\} = \{x_1 x_2 x_3\}^T$, отслеживающий его вращение как жесткого целого [20]. Конечный элемент с помощью полилинейного изопараметрического преобразования отображается на куб $-1 \leq \xi_i \leq 1$ ($i = \overline{1, 3}$):

$$x_i = \sum_{k=1}^8 x_i^k N_k(\xi_1 \xi_2 \xi_3), \quad N_k = (1 + \xi_1 / \xi_1^k)(1 + \xi_2 / \xi_2^k)(1 + \xi_3 / \xi_3^k) / 8. \quad (5)$$

Здесь x_i^k, ξ_i^k – координаты узлов в базисах x, ξ ; N_k – функции формы. Для предотвращения развития мод нулевой энергии компоненты скорости деформаций $\dot{\epsilon}_{ij}$ в КЭ аппроксимируются линейными функциями

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^0 + \dot{\epsilon}_{ij}^1 \xi_1 + \dot{\epsilon}_{ij}^2 \xi_2 + \dot{\epsilon}_{ij}^3 \xi_3. \quad (6)$$

По аналогии с теорией оболочек $\dot{\epsilon}_{ij}^0$ – значения компонент скорости деформаций в центре КЭ далее будут называться безмоментными составляющими, а их градиент $\dot{\epsilon}_{ij}^k = \partial \dot{\epsilon}_{ij} / \partial \xi_k = \text{const}$ – моментными составляющими. Чтобы не завышать сдвиговую жесткость элемента, в (6) учитываются только компоненты $\dot{\epsilon}_{ij}^k$, соответствующие изгибающим и крутящим моментам в теории оболочек [21]. На основе (6) разработано семейство конечных элементов для моделирования сложных составных конструкций, включающих деформируемые среды, массивные тела и оболочки [16].

Мощность виртуальной работы в каждом конечном элементе в уравнении (1) выражается через матрицу масс, узловые ускорения и статически эквивалентные узловые силы. После замены интегрирования по области Ω суммированием по элементам получим дискретный аналог уравнений движения

$$[M]\{\ddot{U}\} = \{F\}, \quad (7)$$

где $[M]$ – диагональная матрица масс; $\{\ddot{U}\}; \{F\}$ – векторы, составленные из ускорений узлов КЭ-сетки и результирующих узловых сил в общей системе координат. Система обыкновенных дифференциальных уравнений (7) интегрируется по явной конечно-разностной схеме типа «крест».

Численное определение контактного давления в зонах взаимодействия деформируемых тел и статически эквивалентных ему сил в узлах КЭ-сетки осуществляется из условий непроникания и законов сохранения массы и количества движения [18]. Изложенная методика реализована в рамках вычислительной системы (ВС) «Динамика-3», аттестованной в научно-техническом центре по ядерной и радиационной безопасности (Аттестационный паспорт программного средства. Регистрационный паспорт аттестации ПС № 325 от 18.04.2013) и Госстандарте РФ (Программный продукт «Пакет прикладных программ для решения трехмерных задач нестационарного деформирования конструкций, включающих массивные тела и оболочки, «Динамика-3» (ППП «Динамика-3»): Сертификат соответствия Госстандарта России № РОСС RU.МЕ20.Н00338). В ходе аттестации ВС «Динамика-3» были выполнены исследования точности, сходимости и устойчивости реализованных в ней математической модели и методики решения [16, 18, 20]. Результаты исследований подтвердили их эффективность в рассматриваемом классе задач.

При численном анализе напряженно-деформированного состояния реактора типа БН в условиях запроектной аварии элеватор, главные циркуляционные насосы и промежуточные теплообменники моделировались недеформируемыми цилиндрическими оболочками с одинаковыми геометрическими параметрами. С учетом циклической симметрии рассматриваемой конструкции (рис. 1) и условий нагружения в качестве расчетной области выбрана 1/20 часть реактора. Общее количество узлов дискретной модели расчетной области составило 13325. Из них 1212 узлов приходилось на корпус реактора и обечайку защиты. Применение относительно грубой дискретизации конструкции стало возможным благодаря принятой аппроксимации скорости деформаций и напряжений [16], которая является, по существу, численной реализацией шестимодального варианта теории типа Тимошенко [21] и позволяет моделировать динамику тонкостенных оболочек на сетках с одним элементом по толщине. Как показало сопоставление результатов численного решения осесимметричной задачи без учета промежуточных теплообменников и главных циркуляционных насосов реактора в трехмерной и осесимметричной постановках [6], применяемая методика [16, 18, 20] обеспечивает приемлемую точность решения на такой конечно-элементной сетке.

Результаты численных исследований представлены на рис. 4–6 в виде графиков временной зависимости: а) контактной силы $\tilde{F} = F / (P_0 S_p)$, действующей на днище центральной колонны и поворотной пробки (S_p – площадь днища центральной колонны и поворотной пробки); б) скорости вертикального смещения V поворотной пробки; в) интенсивности напряжений, вычисленных в среднем по вертикали в поперечном сечении цилиндрической обечайки корпуса. Пунктирной и сплошной линиями на этих рисунках

выделены результаты конечно-элементного решения осесимметричной и неосесимметричной задач в трехмерной постановке без учета и с учетом внутрибакового оборудования.

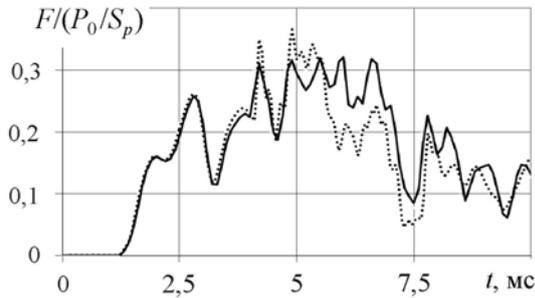


Рис. 4. Изменение во времени контактной силы, действующей на днище центральной колонны и поворотной пробки

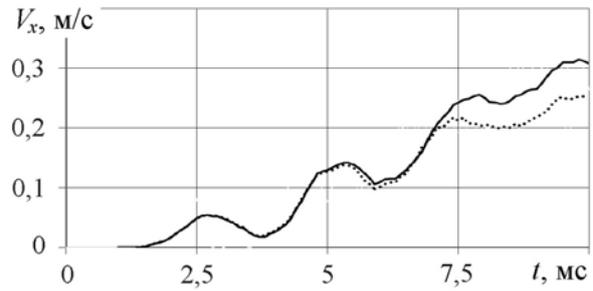


Рис. 5. Изменение во времени скорости вертикального смещения поворотной пробки

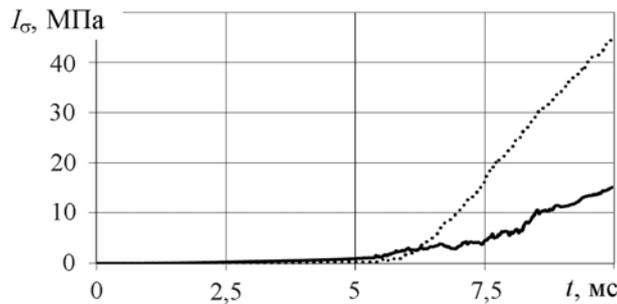


Рис. 6. Изменение во времени интенсивности напряжений, вычисленных в среднем по вертикали в поперечном сечении цилиндрической обечайки корпуса

Анализ результатов численного моделирования показал следующее.

На рассмотренном интервале времени ГЦН и ПТО существенно снижают гидродинамическую нагрузку на корпус реактора и интенсивность напряжений в корпусе. Так, максимальное значение интенсивности напряжений, достигаемое в среднем по вертикали поперечном сечении цилиндрической обечайки, уменьшилось в три раза. Влияние ГЦН/ПТО на гидродинамическую нагрузку на днище центральной колонны незначительно. Максимальное значение интегральной гидродинамической нагрузки $F(t) = F_k + F_p$, действующей на днище центральной колонны F_k и поворотной пробки F_p , меняется мало. Это связано с тем, что возрастание нагрузки на днище поворотной пробки, вызванное волнами, отраженными от ГЦН/ПТО, происходит в промежуток времени, когда нагрузка, действующая на днище центральной колонны со стороны зоны энерговыделения, уже убывает.

Наличие внутриреакторного оборудования приводит к возрастанию давления на поворотную пробку и увеличению ее скорости вертикального смещения примерно на 16 %. Под влиянием вертикального смещения поворотной пробки и увеличения продольных растягивающих напряжений в средней части цилиндрической обечайки силового корпуса происходит остановка движения и изменение знака скорости радиальных перемещений.

Влияние внутрибакового оборудования на гидродинамическую нагрузку на днище центральной колонны и поворотную пробку проявляется на нестационарной стадии развития запроектной аварии ($8 \text{ мс} \leq t \leq 10 \text{ мс}$). Поэтому исследование более длительной стадии развития запроектной аварии допустимо проводить в двумерной (осесимметричной) постановке.

Максимальный уровень напряжений в корпусе реактора при реализации ЗА не превышает допустимых нормами прочности значений [24]. Таким образом, проведенный анализ продемонстрировал потенциальную возможность локализации внутри силового корпуса реактора последствий запроектной аварии, предотвращения опасного радиационного воздействия на персонал АС и окружающую среду.

Выводы

Главные циркуляционные насосы и промежуточные теплообменники снижают гидродинамическую нагрузку на силовой корпус в средней части реактора и увеличивают напряжения в месте крепления поворотной пробки к горловине. Численное исследование стадии развития запроектной аварии после достижения максимальных значений давления на поворотную пробку допустимо проводить в двумерной (осесимметричной) постановке. Обесточивание атомной станции с потерей источников энергоснабжения, включая резервные, с одновременным несрабатыванием всех средств воздействия на реактивность не приводит к разгерметизации корпуса реактора на быстрых нейтронах, что подтверждает высокий уровень безопасности реакторной установки.

«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 15-19-10039). Математическая модель и методика решения разработаны в Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского. Численный анализ нестационарного деформирования реактора на быстрых нейтронах с жидким теплоносителем в условиях запроектной аварии типа ULOF выполнен совместно с сотрудниками АО „ОКБМ Африкантов“».

Библиографический список

1. Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в 21 веке / Авронин Е.Н. [и др.]; ОАО «НИКИЭТ». – М., 2012. – 62 с.
2. О стратегии ядерной энергетики России до 2050 года / П.Н. Алексеев, В.Г. Асмолов, А.Ю. Гагаринский, Н.Е. Кухаркин, Ю.М. Семченков, В.А. Сидоренко, С.А. Субботин, В.Ф. Цибульский, Я.И. Штромбах; НИЦ «Курчатовский институт». – М., 2012. – 144 с.
3. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. – М.: ИздАТ, 2010. – 496 с.
4. Final Report of the International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi NPP. 7-15 October 2011. – Vienna: IAEA, 2011. – 80 p.
5. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций ОПБ-88/97, НП-001-97 (ПНАЭ Г-01-011-97) – М.: Энергоатомиздат, 1998.
6. Расчет напряженно-деформированного состояния корпусов реакторов типа БН в условиях гипотетической аварии / В.Г. Баженов [и др.] // Машиноведение. – М.: Наука, 1985. – № 3. – С. 62–68.
7. Волков А.В., Кузнецов И.А. Усовершенствованная модель кипения натрия для анализа аварий в быстром реакторе // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2006. – № 2. – С. 101–111.
8. Ашурко Ю.М., Волков А.В., Раскач К.Ф. Разработка программных модулей для расчета запроектных аварий в быстрых реакторах с учетом пространственно-временной кинетики // Атомная энергия. – 2013. – Т. 114, № 2. – С. 63–67.
9. Использование кода СОКРАТ-БН для расчета задач с кипением натрия и воды в элементах ЯЭУ / А.А. Бутов [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 2/2. – С. 137–141.

10. Ninokata H. A Comparative Overview of Thermal Hydraulic Characteristics of Integrated Primary System Nuclear Reactors // Journal of Nuclear Engineering and Technology. – 2006. – Vol. 38. – No. 1. – P. 33–44.
11. Experimental verification of the fast reactor safety analysis code SIMMER-III for transient bubble behavior with condensation / K. Morita, T. Matsumoto, K. Fukuda, Y. Tobita, H. Yamano, I. Sato // Nuclear Engineering and Design. – 2008. – Vol. 238. – P. 49–56.
12. Поздеев А.А., Трусов П.В., Няшин Ю.И. Большие упругопластические деформации: теория, алгоритмы, приложения. – М.: Наука, 1986. – 232 с.
13. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. – 262 с.
14. Bathe K.-Y. Finite element procedures. – New Jersey: Upper Saddle River «Prentice Hall», 1996. – 1037p.
15. Волков И.А., Коротких Ю.Г. Уравнения состояния вязкоупругопластических сред с повреждениями. – М.: Физматлит, 2008. – 424 с.
16. Верификация конечно-элементного решения трехмерных нестационарных задач упругопластического деформирования, устойчивости и закритического поведения оболочек / А.А. Артемьева [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. – 2010. – Т. 3, № 2. – С. 5–14.
17. Аннин Б.Д., Коробейников С.Н. Допустимые формы упругих законов деформирования в определяющих соотношениях упругопластичности // Сиб. журн. индустр. мат. – 1998. – Т. 1, № 1. – С. 21–34.
18. Баженов В.Г., Кибец А.И., Цветкова И.Н. Численное моделирование нестационарных процессов ударного взаимодействия деформируемых элементов конструкций // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 1995. – № 2. – С. 20–26.
19. Голованов А.И., Тюленева О.Н., Шигабулдинов А.Ф. Метод конечных элементов в статике и динамике тонкостенных конструкций. – М.: Физматлит, 2006. – 391 с.
20. Конечно-элементное моделирование упругопластического выпучивания незамкнутых сферических оболочек при сжатии / В.Г. Баженов, А.А. Артемьева, Е.Г. Гоник, А.И. Кибец, Д.В. Шошин, Т.Г. Федорова // Проблемы прочности и пластичности. – 2012. – № 74. – С. 84–91.
21. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под ред. А.С. Сахарова и И. Альтенбаха. – Киев: Вища школа; Лейпциг: ФЭБ Фахбухферлаг, 1982. – 480 с.
22. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86). – М.: Энергоатомиздат, 1989.

References

1. Avrorin E.N. [et al.] Kontseptual'nye polozheniia strategii razvitiia iadernoi energetiki Rossii v 21 veke [Conceptual provisions of the strategy of development of nuclear energy in Russia in the 21st century]. Moscow, 2012. 62 p.
2. Alekseev P.N., Asmolov V.G., Gagarinskii A.Iu., Kukharkin N.E., Semchenkov Iu.M., Sidorenko V.A., Subbotin S.A., Tsibulskii V.F., Shtrombakh Ia.I. O strategii iadernoi energetiki Rossii do 2050 goda [On the Strategy of Russian nuclear power by 2050]. Moscow: National Research Centre “Kurchatov Institute”, 2012. 144 p.
3. Kryshev I.I., Riazantsev E.P. Ekologicheskaiia bezopasnost' iaderno-energeticheskogo kompleksa Rossii [Environmental safety of nuclear power complex of Russia]. Moscow: Izdat, 2010. 496 p.
4. Final Report of the International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi NPP. 7-15 October. Vienna: IAEA, 2011. 80 p.
5. Obshchie polozheniia obespecheniia bezopasnosti atomnykh stantsii OPB-88/97, NP-001-97 (PNAE G-01-011-97) [General safety of nuclear power plants OPB-88/97, NP-001-97 (PNAE G-01-011-97)]. Moscow: Energoatomizdat, 1998.
6. Bazhenov V.G., Zhukov V.V., Zamiatin V.A., Kochetkov A.V., Krylov S.V. Raschet napriazhenno-deformirovannogo sostoiianiia korpusov reaktorov tipa BN v usloviakh gipoteticheskoi avarii [Calculation of the stress-strain state of the buildings of fast reactors under hypothetical accident]. Mashinovedenie, 1985, no. 3, pp. 62-68.

7. Volkov A.V., Kuznetsov I.A. Uovershenstvovannaia model' kipeniia natriia dlia analiza avarii v bystrom reaktore [Enhanced sodium boiling model for analysis of accidents in fast reactors]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Iadernaia energetika*, 2006, no. 2, pp. 101-111.
8. Ashurko Yu.M., Volkov A.V., Raskach K.F. Razrabotka programmnykh modulei dlia rascheta zaproektnykh avarii v bystrykh reaktorakh s uchetom prostranstvenno-vremennoi kinetiki [Development of program modules with space-time kinetics for calculating unanticipated accidents in fast reactors]. *Atomic Energy*, 2013, vol. 114, no. 2, pp. 77-82.
9. Butov A.A., Vozhakov I.S., Zhigach S.A., Kudashov I.G., Lezhnin S.I., Usov E.V. Ispol'zovanie koda SOKRAT-BN dlia rascheta zadach s kipeniem natriia i vody v elementakh IaEU [Use Code SOCRATES-BN for calculation tasks with boiling water and sodium in the elements of nuclear power units]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika*, 2012, vol. 55, no. 2, pp. 137-141.
10. Ninokata H. A Comparative Overview of Thermal Hydraulic Characteristics of Integrated Primary System Nuclear Reactors. *Journal of Nuclear Engineering and Technology*, 2006, vol. 38, no. 1, pp. 33-44.
11. Morita K., Matsumoto T., Fukuda K., Tobita Y., Yamano H., Sato I. Experimental verification of the fast reactor safety analysis code SIMMER-III for transient bubble behavior with condensation. *Nuclear Engineering and Design*, 2008, vol. 238, pp. 49-56.
12. Pozdeev A.A., Trusov P.V., Niashin Yu.I. Bol'shie uprugoplasticheskie deformatsii: teoriia, algoritmy, prilozheniia [The large elastoplastic deformation theory, algorithms, applications]. Moscow: Nauka, 1986. 232 p.
13. Korobeinikov S.N. Nelineinoe deformirovanie tverdykh tel [Nonlinear deformation of solids]. Novosibirsk: Sibirskoe otdelenie Rossiiskoi akademii nauk, 2000. 262 p.
14. Bathe K.-Y. Finite element procedures. New Jersey: Upper Saddle River «Prentice Hall», 1996. 1037 p.
15. Volkov I.A., Korotkikh Yu.G. Uravneniia sostoianiia viazkouprugoplasticheskikh sred s povrezhdeniiami [Equations of state viscoelastoplastic media with injuries]. Moscow: Fizmatlit, 2008. 424 p.
16. Artem'eva A.A., Bazhenov V.G., Kibets A.I. [et al.] Verifikatsiia konechno-elementnogo resheniia trekhmernykh nestatsionarnykh zadach uprugoplasticheskogo deformirovaniia, ustoichivosti i zakriticheskogo povedeniia obolochek [Verification of the finite-element solution of 3d non-stationary problems of elasto-plastic deformation, stability and supercritical behavior of shells]. *Vychislitelnaia mekhanika sploshnykh sred*, 2010, vol. 3, no. 2, pp. 5-14.
17. Annin B.D., Korobeinikov S.N. Dopustimye formy uprugikh zakonov deformirovaniia v opredeliaiushchikh sootnosheniakh uprugo-plastichnosti [Acceptable forms of elastic laws of deformation in the constitutive relations of elastic-plasticity]. *Sibirskii zhurnal industrialnoi matematiki*, 1998, vol. 1, no. 1, pp. 21-34.
18. Bazhenov V.G., Kibets A.I., Tsvetkova I.N. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh protsessov udarnogo vzaimodeistviia deformiruemykh elementov konstruksii [Numerical simulation of transient processes of shock interaction of deformable elements of constructions]. *Problemy mashinostroeniia i nadezhnosti mashin*, 1995, no. 2, pp. 20-26.
19. Golovanov A.I., Tiuleneva O.N., Shigabutdinov A.F. Metod konechnykh elementov v statike i dinamike tonkostennykh konstruksii [The finite element method in statics and dynamics of thin-walled structures]. Moscow: Fizmatlit, 2006. 391 p.
20. Bazhenov V.G. Artemeva A.A. Gonik E.G. Kibets A.I. Shoshin D.V. Fedorova T.G. Konechno-elementnoe modelirovanie uprugoplasticheskogo vypuchivaniia nezamknutykh sfericheskikh obolochek pri szhatii [Finite-element modeling of elastoplastic buckling of non-closed spherical shells loaded in compression]. *Problemy prochnosti i plastichnosti*, 2012, no. 74, pp. 84-91.
21. Sakharov A.S., Al'tenbakh I. Metod konechnykh elementov v mekhanike tverdykh tel [The method of finite elements in the mechanics of solids]. Kiev: Vishcha shkola; Leiptsig: FEB Fakhbukhferlag, 1982. 480 p.
22. Normy rascheta na prochnost' oborudovaniia i truboprovodov atomnykh energeticheskikh ustanovok (PNAE G-7-002-86). Moscow: Energoatomizdat, 1989.