

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ РАСТВОРНОГО АИР И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ КОРПУСА РЕАКТОРА

Лопухов Николай Владимирович (otd4@expd.vniief.ru), Кораблев Сергей Алексеевич, Плужян Карлен Гагикович

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В работе представлены результаты комплексного расчета одной из перспективных конструкций растворного аperiodического импульсного реактора (АИР). Для моделирования динамики растворных АИР, разработана 1,5D математическая модель. На ее основе проведено моделирование динамики реактора и анализ различных импульсных режимов. Получены нагрузки на элементы конструкции перспективного реактора. Установлены наиболее «слабые» (с точки зрения прочности) элементы корпуса перспективной установки, а именно силовые гильзы. Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) разработана 3D модель силовых гильз и проведен динамический расчет для различных импульсных режимов работы реактора. В результате механико-прочностных расчетов силовых гильз, получены зависимости напряжений и перемещений от времени, возникающие в них за счет механического воздействия разлетающегося топливного раствора.

Ключевые слова: активная зона, импульсный ядерный реактор, динамика реактора, гидродинамика топливного раствора, корпус активной зоны, силовые гильзы, топливный раствор, напряженно-деформированное состояние.

MATHEMATICAL SIMULATION OF SOLUTION-TYPE APERIODIC PULSED REACTOR DYNAMICS AND DETERMINATION OF STRESS-DEFORMED STATE OF THE REACTOR VESSEL ELEMENTS

Lopukhov Nikolaj Vladimirovich (otd4@expd.vniief.ru), Korablev Sergej Alekseevich, Pluzyan Karlen Gagikovich

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The results of complex calculation of one of most promising design versions of aperiodic pulsed reactor (AIR) are presented in the current paper. To simulate dynamics of solution-type AIRs there was developed a 1.5D mathematical model. On its base there was performed simulation of reactor dynamics and analysis of different pulse modes. There were obtained the loads on structure elements of the perspective reactor. Most «weak» (from the point of view of strength) vessel elements of the perspective facility, namely power sleeves, were ascertained. To determine a stress-deformed state (NDS) there was developed a 3D model of power sleeves and performed dynamic calculation for different pulse modes of reactor operation. As a result of power sleeves mechanical and strength calculations there were obtained strength and displacement dependences on time occurring in them due to the mechanical effect of the expanding fuel solution.

Keywords: core, pulsed nuclear reactor, reactor dynamics, hydrodynamics of fuel solution, core vessel, power sleeves, fuel solution, stress-deformed state.

Введение

Корпус растворного АИР работает в жестких тепловых и механических условиях. Для определе-

ния механико-прочностных характеристик корпуса растворного реактора необходимо провести комплекс расчетов, учитывающих динамику топливного раствора в процессе генерации импульса делений.

Таким образом, для анализа НДС корпуса АИР необходимо знать поле скоростей и давлений в растворе и в буферном газе (надтопливное пространство).

Семейство растворных АИР и близких к ним импульсных растворных критических систем довольно представительно по численности и разнообразию вариантов. В настоящее время в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ» ведутся работы по созданию новых перспективных установок подобного класса. В данной работе представлены результаты комплексного расчета одной из перспективных конструкций растворного АИР. Комплексный расчет включает в себя: математическое моделирование нейтронно-физических, гидродинамических и тепловых процессов, протекающих в топливном растворе и буферном газе, расчет динамических нагрузок и определение НДС элементов корпуса реактора.

Для моделирования динамики растворных АИР, разработана 1.5D математическая модель. На ее основе проведено моделирование динамики реактора и анализ различных импульсных режимов. Получены нагрузки на элементы конструкции перспективного реактора, возникающие в процессе разлета топливного раствора, которые использованы для расчета механики корпуса.

Установлены наиболее «слабые» (с точки зрения прочности) элементы корпуса перспективной установки, а именно силовые гильзы. Для определения НДС разработана 3D модель силовых гильз и проведен динамический расчет для различных импульсных режимов работы реактора. В результате механико-прочностных расчетов силовых гильз, получены зависимости напряжений и перемещений от времени, возникающие в них за счет механического воздействия разлетающегося топливного раствора.

Конструкция корпуса активной зоны перспективного растворного реактора

Перспективная установка является растворным импульсным реактором самогасящегося действия. Генерирование импульса делений в перспективном растворном АИР производится путем вывода из активной зоны управляющих стержней, содержащих поглотитель нейтронов. Инициирование импульса осуществляется за счет нейтронов собственного фона. Формирование импульса происходит автоматически за счет внутренних механизмов самогашения, приводящих к расширению активной зоны и снижению реактивности.

Корпус активной зоны (АЗ) перспективного растворного реактора представляет собой сварной цилиндрический сосуд, выполненный из стали 30ХГСА.

На рис. 1 представлена конструктивная схема корпуса АЗ перспективного реактора.

Корпус имеет сквозной центральный экспериментальный канал переменного диаметра. В верхней крышке корпуса АЗ предусмотрено 8 отверстий.

Семь из них использованы для установки силовых гильз (СГ) с управляющими стержнями. Одно отверстие предназначено для выравнивания давления в корпусе АЗ и баллонах-хранилищах.

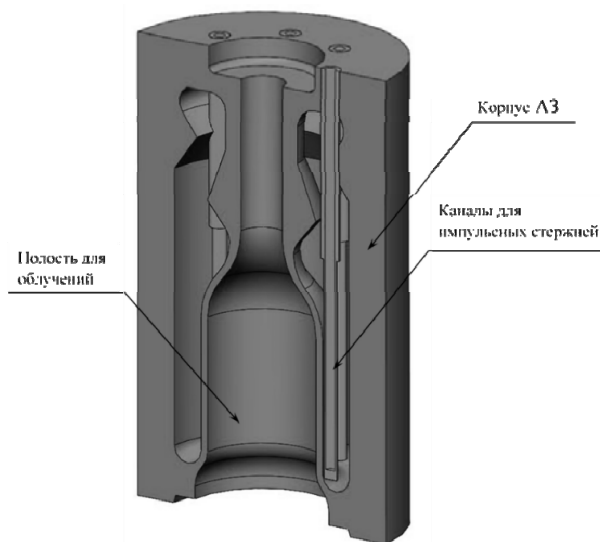


Рис. 1. Конструктивная схема корпуса АЗ перспективного реактора

Активная зона перспективной установки представляет собой раствор соли высокообогащенного (90 % по ^{235}U) урана в воде (уранилсульфата) [1].

1.5D Модель растворного реактора

Процессы, происходящие в растворном импульсном ядерном реакторе, обусловлены взаимодействием чрезвычайно разнообразных явлений – нейтронных, гидродинамических, радиационных, молекулярных и т. п. В процессе импульса делений в топливном растворе (ТР) на треках осколков деления образуются радиолитические пузыри, содержащие пары воды и молекулярные водород и кислород (в соотношении 2 к 1). Образование радиолитических пузырьков, как и фактор возрастания температуры, являются причиной гашения реактивности и подъема давления в АЗ в ходе импульса. Последнее может привести к разлету ТР. При больших удельных энерговыделениях разлетающийся ТР может вплотную приблизиться к крышке корпуса реактора, в результате чего происходит сильное сжатие буферного газа, заполняющего пространство между крышкой корпуса и свободной поверхностью ТР. Удар ТР о крышку является причиной возникновения высоких давлений в верхней части корпуса. Удар топливного раствора о крышку корпуса не является единственной причиной возникновения серьезных динамических нагрузок. За счет изгибов корпуса движущийся топливный раствор приобретает радиальную составляющую скорости, что приводит

к возникновению изгибающих нагрузок, действующих на стержневые каналы.

Разработанная в 70-е годы XX века во ВНИИЭФ математическая модель динамики растворных реакторов [3] является одномерной, в ее основе лежит подход, согласно которому реальная геометрия реактора заменяется эквивалентным цилиндром. В такой постановке процесс разлета топливного раствора рассматривается как одномерное движение жидкости вдоль оси цилиндра. Данный подход применялся для расчета динамики реакторов семейства ВИР, на его основе получены важные результаты и хорошее согласие с экспериментами [3]. Применимость одномерной модели к реакторам семейства ВИР объясняется близостью его конструкции к цилиндрической форме, особенно в верхней части, куда происходит разлет топливного раствора. Однако одномерная модель имеет и некоторые «недостатки», они связаны с выбором высоты и площади сечения эквивалентного цилиндра. Эти параметры можно считать в некотором роде «подгончными», так как их выбор строго не определен. Другая сложность возникает, если в верхней части реактора площадь сечения имеет серьезную неравномерность, тогда сложно будет говорить об одномерности движения. Как отмечалось выше в реакторах, имеющих сложную (не цилиндрическую) форму корпуса могут возникать изгибающие нагрузки, действующие на стержневые каналы. Наличие вышеупомянутых нагрузок как раз может иметь место в перспективном реакторе, схема корпуса которого представлена на рис 1. Определение изгибающих нагрузок, действующих на стержневые каналы с применением одномерной модели, не представляется возможным. Для решения вышеперечисленных трудностей и задач разработана 1.5D модель растворных импульсных реакторов.

Полная система уравнений, описывающих динамику гомогенных водных импульсных реакторов, включает уравнения нейтронной кинетики, уравнения гидродинамики и уравнения радиолитического кипения, отражающие поведение во времени газовых пузырьков.

В 1.5D модели растворных импульсных реакторов без изменения (по отношению к одномерной модели) остаются термодинамические соотношения, уравнения состояния, модель радиолитического кипения и уравнения нейтронной кинетики, представленные в работе [3]. Изменятся лишь уравнения неразрывности и движения.

Опишем идею 1.5D модели (дадим определение, что понимается под этим термином) и проведем вывод уравнений гидродинамики в 1.5D приближении. Отметим сразу, что полуторазмерность модели динамики растворных АИР заключается именно в описании гидродинамических процессов.

Рассмотрим вертикальный сосуд с переменной площадью сечения по высоте (см. рис. 2), движение жидкости происходит в направлении вертикальной оси. Разобьем жидкость на N участков, в области каждого разбиения параметры не зависят от координат

(как и для одномерной модели), массу участка сосредоточим в центре. Будем предполагать, что в процессе движения плоскости сечений не изгибаются и не поворачиваются, то есть жидкость разлетается горизонтальными «блинами», которые могут сжиматься и расширяться в горизонтальном направлении под действием стенок сосуда (жидкость как бы «приклеена» к стенкам). Влиянием вязкости жидкости пренебрегается.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{\partial v_i}{\partial t} = \frac{1}{m_i} \left(S(z_{i+1}) \frac{dz_{i+1}}{dt} - S(z_i) \frac{dz_i}{dt} \right) \quad (1)$$

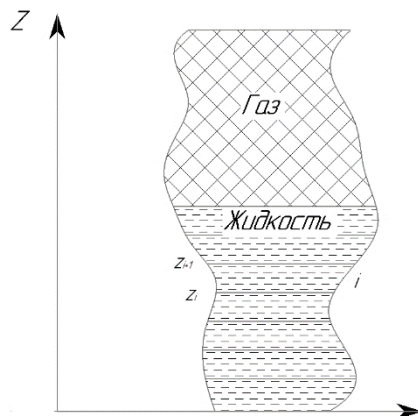


Рис. 2. Сосуд с переменной площадью сечения, заполненный жидкостью

Для описания движения ТР используется уравнение:

$$m_i \frac{dU_i}{dt} = - \iint \iint \frac{\partial P}{\partial z} dV = \int_{z_i}^{z_{i+1}} \frac{\partial P}{\partial z} S(\xi) d\xi \quad (2)$$

Малыми буквами z и u обозначаются координаты и скорости сечений, а большими Z, U координаты и скорости центра масс. Займемся определением величины $\frac{\partial P}{\partial z}$, для этого в пределах каждого участка

давление представим в виде $P_i(z) = a_i z^2 + b_i z + c_i$, для определения коэффициентов a_i, b_i, c_i наложим на функцию $P(z)$ следующие условия:

$$(P_i) V_i = \int_{z_i}^{z_{i+1}} P_i(\xi) S(\xi) d\xi \quad (3)$$

$$P_i(z_{i+1}) = P_{i+1}(z_{i+1}) \quad (4)$$

$$\frac{dP_i(z_{i+1})}{dz} = \frac{dP_{i+1}(z_{i+1})}{dz} \quad (5)$$

Первое условие представляет собой теорему о среднем, два других говорят о непрерывности функции P и ее производных на плоскостях сечений

(условия шивки). Стоит отметить, что при подобной интерполяции газ, находящийся над жидкостью, также является областью разбиения: на верхней и нижней границе расчетной области задаются условия $dP = \rho g dz$.

Так как мы ввели два вида координат: центра масс и плоскостей сечений, нам понадобится связь между ними. Найдем ее, используя определение центра масс тела:

$$Z_i = \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} \xi S(\xi) d\xi}{\int_{z_i}^{z_{i+1}} S(\xi) d\xi} \quad (6)$$

Дифференцируя равенство (6) по времени t (от времени зависят величины Z_i , z_{i+1} , z_i , производная от интегралов берется по правилу дифференцирования интегралов по параметру) получим связь скоростей сечений и центра масс:

$$U_i = \frac{1}{\int_{z_i}^{z_{i+1}} S(\xi) d\xi} \times \times [(z_{i+1} - Z_i)S(z_{i+1})u_{i+1} - (z_i - Z_i)S(z_i)u_i] \quad (7)$$

Таким образом, система уравнений, описывающая динамику растворного реактора, включает следующие уравнения: термодинамические соотношения, уравнения состояния, модель радиолитического кипения и уравнения нейтронной кинетики, представленные в работе [3], которые остались без изменений, и уравнения неразрывности и движения (1, 2) дополненные алгебраическими уравнениями (3–5, 7).

Корпус перспективного растворного импульсного реактора имеет сложную форму, что приводит к неоднородности движения топливного раствора в процессе разлета. За счет изгибов корпуса топливный раствор приобретает радиальную составляющую скорости, что приводит к возникновению изгибающих сил, действующих на стержневые каналы.

Перейдем к определению радиальных усилий, действующих на стержневые каналы со стороны топливного раствора. Из расчета динамики реактора не представляет труда определить радиальную составляющую скорости центра масс каждого сечения: согласно уравнению движения изменение скорости в радиальном направлении вызвано градиентом давления в радиальном направлении. По градиенту давления можно определить силу, действующую на стержневые каналы в радиальном направлении.

Радиус центра масс i -го участка реактора дается выражением:

$$R_i = \frac{1}{3} \frac{\int_{z_i}^{z_{i+1}} (r_2^3(z) - r_1^3(z)) dz}{\int_{z_i}^{z_{i+1}} (r_2^2(z) - r_1^2(z)) dz} \quad (8)$$

где $r_2(z)$ и $r_1(z)$ – радиусы внешней и внутренней стенок корпуса реактора в зависимости от высоты, z_{i+1} и z_i – координаты верха и низа области (элемента объема топливного раствора). Скорость в радиальном направлении находим, дифференцируя (8) по t (от времени зависят z_{i+1} и z_i , интегралы дифференцируем по правилу дифференцирования интегралов по параметру), получим:

$$U_{ir} = \frac{1}{3 \int_{z_i}^{z_{i+1}} (r_2^2(z) - r_1^2(z)) dz} \times \times \left\{ \left[r_2^3(z_{i+1}) - r_1^3(z_i) - 3R(r_2^2(z_{i+1}) - r_1^2(z_{i+1})) \right] u_{i+1} - \right. \\ \left. - \left[r_2^3(z_i) - r_1^3(z_i) - 3R(r_2^2(z_i) - r_1^2(z_i)) \right] u_i \right\} \quad (9)$$

Функции $z_{i+1}(t)$, $z_i(t)$ и $u_i(t)$, $u_{i+1}(t)$ известны по результатам расчета динамики реактора, таким образом, известна зависимость от времени радиальной составляющей скорости центра масс для каждого участка топливного раствора. Согласно уравнению движения:

$$m_i \frac{dU_{ir}}{dt} = \iiint \frac{\partial P_i}{\partial r} dV = \left\langle \frac{\partial P}{\partial r} \right\rangle_i V_i \quad (10)$$

Для среднего значения радиальной составляющей градиента давления в i -ой области получим выражение:

$$\left\langle \frac{\partial P}{\partial r} \right\rangle_i = \rho_i \frac{dU_{ir}}{dt} \quad (11)$$

Производную в правой части (11) можно взять численно. Предположим, что стержень слабо возмущает поток жидкости, то есть будем рассматривать стержень в среде, где градиент давления в направлении перпендикулярном оси стержня определяется по выражению (11), тогда для силы, действующей со стороны i -го участка топливного раствора перпендикулярно оси стержня, получим выражение:

$$F_i = \iint P_i dS = \iiint \frac{\partial P}{\partial r} dV = \frac{\pi d^2 (z_{i+1} - z_i)}{4} \rho_i \frac{dU_{ir}}{dt} \quad (12)$$

где d – диаметр стержневого канала.

Полученные зависимости силы от времени использованы для проведения расчетов напряженно-деформированного состояния стержневых каналов (силовые гильзы).

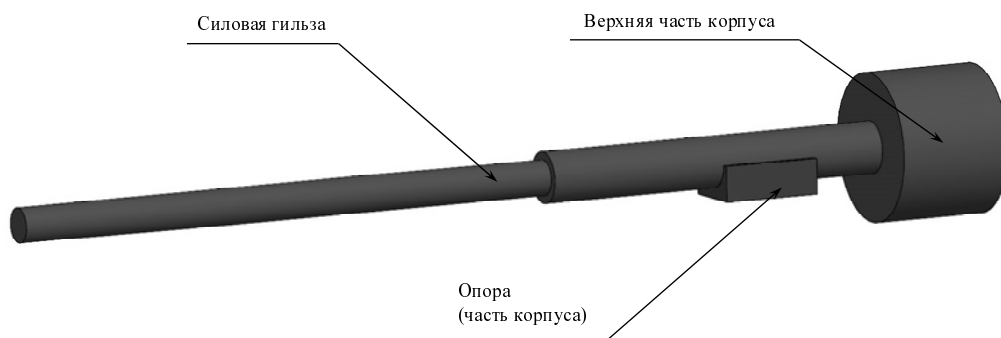


Рис. 3. Конструктивная модель силовой гильзы

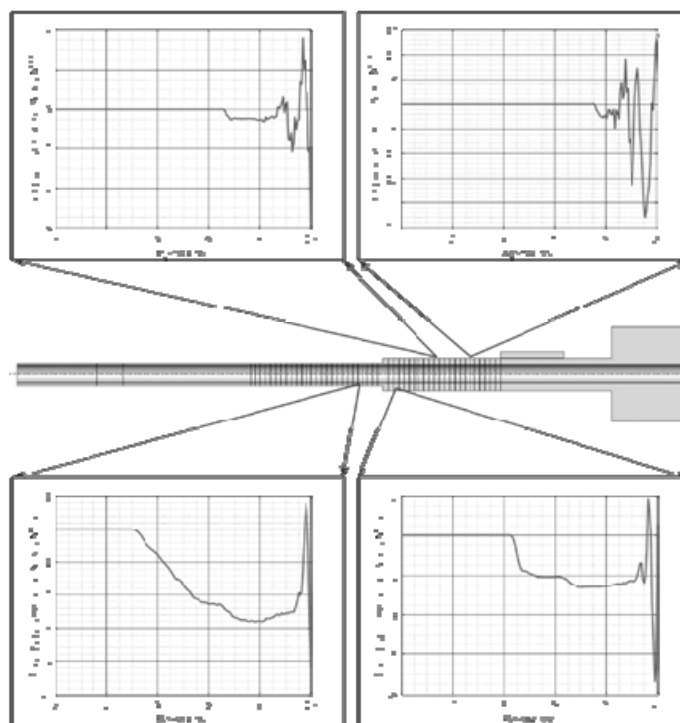


Рис. 4. Схема нагружения силовой гильзы

Расчетная модель силовых гильз

Расчеты прочности силовых гильз проведены методом конечных элементов. На основе конструкторской документации была разработана цифровая трехмерная модель СГ корпуса перспективного реактора, представленная на рис. 3.

СГ перспективного реактора выполнены из нержавеющей стали 12Х18Н10Т. При задании физико-механических характеристик материала использовались соответствующие государственные стандарты и данные справочников [2].

В результате расчета динамики перспективного АИР получены значения силы, действующей со стороны i -го участка топливного раствора перпендикулярно оси стержня, расчет проводился с использованием уравнений (8-12). Для проведения механических расчетов сила переведена в нагрузку, распределенную по поверхности СГ. Расчеты дина-

мики топливного раствора реактора показали серьезную неравномерность нагружения СГ по ее длине. В нижней области реактора, где корпус имеет цилиндрическую форму, изгибающие нагрузки не возникают. В верхней области реактора после опоры (см. рис. 3), СГ практически вплотную примыкают к корпусу, следовательно, изгибающие нагрузки отсутствуют. В средней части СГ наблюдаются наибольшие изгибающие нагрузки, и они неравномерны, ближе к опоре топливный раствор изгибает СГ в направлении от оси корпуса, а на расстоянии 0,7 м от дна реактора изгиб происходит в направлении к оси реактора. Для учета неравномерности нагружения СГ по высоте, при проведении механических расчетов центральная часть СГ разбивалась на 49 областей (ширина каждой области составляет 10 мм), к каждой области прикладывались свои значения распределенной нагрузки, рассчитанные ранее (см. рис. 4).

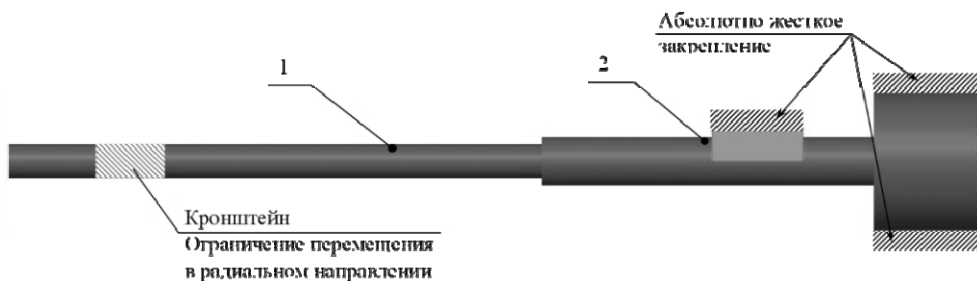


Рис. 5. Схема расположения точек для определения значений перемещений и напряжений

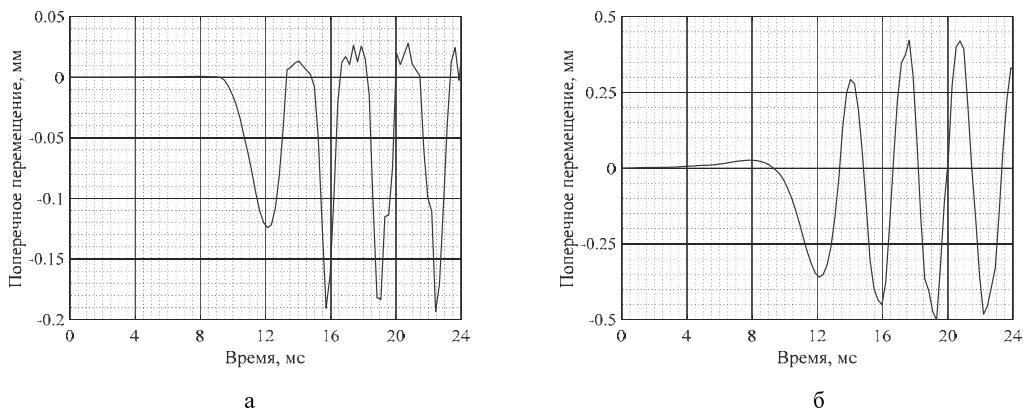


Рис. 6. Зависимость поперечных перемещений от времени при энерговыделении 40 МДж: а – точка 1, б – точка 2

Расчет изгиба силовых гильз

Проведены динамические расчеты НДС силовой гильзы для четырех случаев энерговыделения: 40 МДж, 50 МДж, 60 МДж и 65 МДж. На рис. 5 показаны точки, в которых были определены значения перемещений и напряжений в материале силовой гильзы корпуса АИР. Области, в которых находятся данные точки, выбраны потому, что для них наиболее велика вероятность возникновения больших поперечных перемещений или напряжений, которые могут привести к пластическим деформациям. При извлечении регулирующего стержня большие поперечные перемещения (изгиб гильзы) или пластические деформации силовых гильз могут привести к повреждениям регулирующих стержней, а именно к задирам или заклиниванию стержня в гильзе.

Места расположения контрольных точек, рис. 5:

- точка 1 расположена в средней части СГ (место, где значение перемещений максимально);
- точка 2 расположена вблизи опоры, (место возникновения максимальных напряжений).

Динамический расчет при энерговыделении 40 МДж

Наибольшие поперечные перемещения наблюдаются в области точки 1, возникающие от воздействия удара ТР о силовую гильзу. На рис. 6 показаны

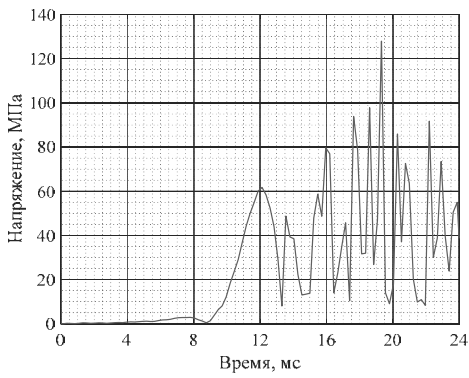
зависимости поперечных перемещений в точках 1 и 2 СГ от времени при энерговыделении 40 МДж.

Из рис. 6 видно, что амплитуда поперечных перемещений СГ составляет 0,5 мм, что может привести к затиранию поглощающих стержней при их движении в СГ. Из-за того, что перемещение СГ происходит в основном в поперечном направлении (в азимутальном направлении изгибающие силы отсутствуют), затирание стержней будет наблюдаться в областях, максимально и минимально удаленных от оси корпуса реактора. На графиках, показывающих поперечные перемещения СГ, отрицательные значения перемещений соответствуют изгибу СГ в направлении к оси корпуса реактора.

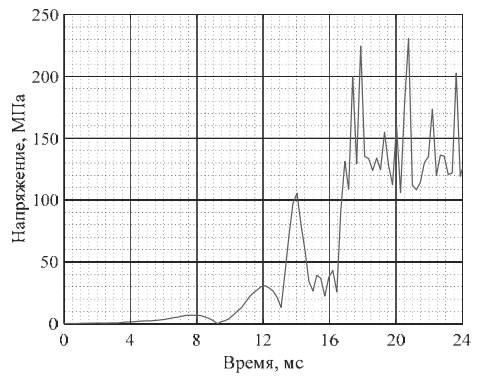
Поскольку стержень также выполняет роль поршня пневмопривода, зазор не может быть велик и должен составлять около 0,5 мм.

Динамический расчет СГ корпуса перспективного реактора показал, что максимальные величины напряжений наблюдаются в точке 2, т. е. эта точка является наиболее «слабым» местом СГ. При энерговыделении 40 МДж полученные зависимости напряжений от времени в точках 1 и 2 показаны на рис. 7.

Из рис. 7 видно, что напряжения в точке 2 достигают 230 МПа, что практически равно $\sigma_{0,2}$. Т. е. в этой области уже даже при энерговыделении 40 МДж могут наблюдаться пластические деформации СГ.



а

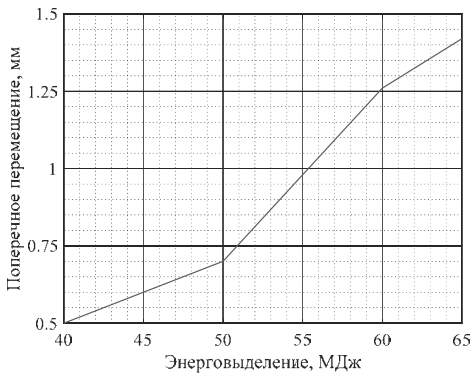


б

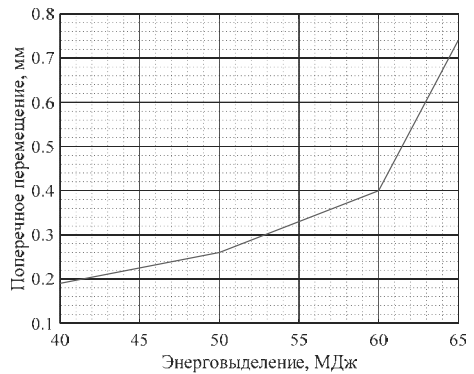
Рис. 7. Зависимость эквивалентных напряжений от времени при энерговыделении 40 МДж: а – точка 1, б – точка 2



Рис. 8. Распределение эквивалентных напряжений в момент удара (40 МДж) (Па)



а



б

Рис. 9. Зависимость максимальных поперечных перемещений от энерговыделения: а – точка 1, б – точка 2

На рис. 8 показано распределение напряжений в силовой гильзе в момент удара ТР о СГ при энерговыделении 40 МДж, величины перемещений увеличены в 100 раз для лучшей наглядности.

Анализ полученных результатов

Если предположить, что величина зазора между СГ и стержнем составляет 0,5 мм, то затирание стержня будет происходить уже при энерговыделении 40 МДж. Поскольку проведенные расчеты пока-

зали, что область максимального поперечного отклонения СГ находится между точками 1 и 2, логично предположить, что затирание будет происходить практически по всей длине стержня. Затирание стержней будет наблюдаться в областях, максимально и минимально удаленных от оси корпуса реактора.

На рис. 9 показаны зависимости максимальных поперечных перемещений от энерговыделения, определенных в точках 1 и 2.

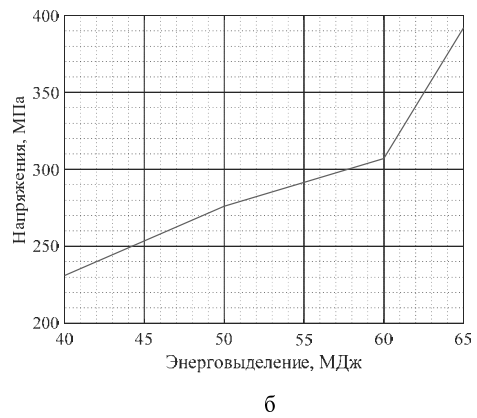
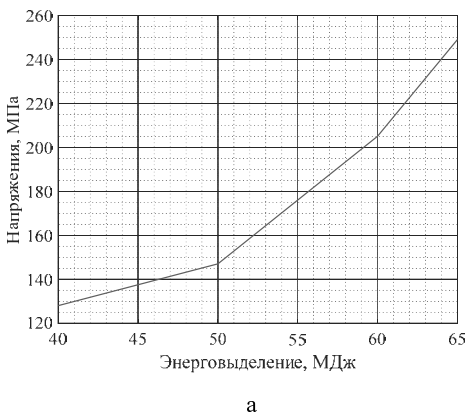


Рис. 10. Зависимость максимальных эквивалентных напряжений от энерговыведения: а – точка 1, б – точка 2

На рис. 10 показаны зависимости максимальных эквивалентных напряжений от энерговыведения, определенных в точках 1 и 2.

Из рис. 10 видно, что эквивалентные напряжения в точке 2 превосходят $\sigma_{0,2}$ при энерговыведении выше 40 МДж, а в точке 1 – при энерговыведении ~65 МДж.

Заключение

В работе представлена 1.5D модель растворных импульсных ядерных реакторов, определены параметры импульса делений перспективного реактора. Проведено моделирование динамики ТР и определены динамические нагрузки на силовую гильзу, возникающие в процессе генерации импульса делений. Разработана трехмерная расчетная модель силовой гильзы, находящаяся внутри корпуса перспективного импульсного растворного реактора, и проведен анализ НДС при воздействии импульсных нагрузок.

Показано, что:

- при работе в импульсном режиме самым нагруженным местом силовой гильзы является область контакта силовой гильзы с корпусом;
- при работе в импульсном режиме наибольшие перемещения силовой гильзы наблюдаются в ее средней части, причем при энерговыведении 40 МДж смещение СГ достигает 0,5 мм, что может привести к затиранию стержней.

Список литературы

1. Колесов В. Ф. Аperiodические импульсные реакторы. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 1999. С. 1032.
2. Сорокин В. Г. и др. Стали и сплавы. Марочник. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. С. 608.
3. Сизов А. Н., Колесов В. Ф. Динамика гомогенных водных импульсных реакторов // ВАНТ. Сер. Импульсные реакторы. 1973. Вып. 2. С. 55–59.