

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТОПЛИВНОГО РАСТВОРНОГО АПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА И ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КОРПУСА РЕАКТОРА ВИР-3

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

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

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) корпуса импульсного ядерного реактора (ИЯР) ВИР-3 (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров), обусловленного динамикой топливного раствора при генерации импульса делений и работой в статическом режиме.

Целью работы является создание цифровой модели корпуса активной зоны ИЯР ВИР-3 и анализ его НДС под воздействием импульсных нагрузок, а также при работе в статическом режиме. Проведенные исследования позволяют определить наиболее оптимальную геометрию и подтвердить механико-прочностные характеристики корпуса ИЯР ВИР-3.

Ключевые слова: импульсный ядерный реактор, активная зона, растворный импульсный реактор, корпус активной зоны, напряженно-деформированное состояние.

MATHEMATICAL SIMULATION OF FUEL SOLUTION-TYPE APERIODIC PULSED REACTOR AND DETERMINATION OF STRESS-DEFORMED STATE OF THE REACTOR VIR-3 VESSEL

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

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

In the current paper there are presented the results of numerical simulation of stress-deformed state (NDS) of the water pulsed nuclear reactor (IYaR) VIR-3 (FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov), conditioned by the fuel solution dynamics at fission pulse generation and by the operation in the static mode.

The goal of activities is to create a digital model of the IYaR VIR-3 core vessel and analyze its NDS under the effect of impulsive loads as well as at operation in the static mode. The performed researches make it possible to determine optimal geometry and confirm mechanical and strength characteristics of the IYaR VIR-3 vessel.

Keywords: pulsed nuclear reactor, core, solution-type pulsed reactor, core vessel, stress-deformed state.

Введение

Реактор ВИР-2М является одной из наиболее востребованных ядерно-физических установок ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и очень интенсивно используется для проведения различных облучатель-

ных экспериментов и испытаний [1]. В связи с планами по модернизации действующего реактора ВИР-2М [2], нацеленной на повышение облучательных возможностей и эксплуатационных характеристик, предполагается разработка реактора ВИР-3. Растворный импульсный ядерный реактор (ИЯР)

ВИР-3 планируется использовать для проведения испытаний радиационной стойкости аппаратуры, приборов, оборудования, изделий электронной техники и электротехнических устройств, для проведения исследований в области лазеров с ядерной накачкой и критических систем с растворной активной зоной (АЗ). Корпус ИЯР ВИР-3 работает в жестких тепловых и механических условиях, возникающих при генерации импульсов делений, а также при работе в статическом режиме. Основная задача обеспечения безопасной эксплуатации реактора состоит в недопустимости возникновения пластических деформаций и полного исключения нарушения герметичности корпуса.

Модернизация реактора ВИР-2М (разработка ИЯР ВИР-3) предполагает проведение работ по оптимизации структуры и состава АЗ, в том числе оптимизация геометрии корпуса, вследствие чего возникает актуальная задача расчета напряженно-деформированного состояния корпуса реактора. Современные методы численного моделирования поведения механических систем в условиях динамического (импульсного) и статического воздействия позволяют детально исследовать НДС ответственных узлов ядерно-опасных установок на ЭВМ [3].

Авторами данной работы проведен комплексный расчет реактора ВИР-3, включающий в себя расчет динамики топливного раствора (ТР) с помощью специально разработанной программы, а также прочностной расчет корпуса с применением зависимостей давлений от времени на основе полученных данных из расчета динамики ТР.

Конструкция ВИР-3

ИЯР ВИР-3 является результатом глубокой модернизации ИЯР ВИР-2М, в ходе которой изменены геометрические размеры корпуса реактора и его активной зоны (АЗ), а также увеличено количество органов регулирования (ОР) до 8 штук (вместо 6 у ВИР-2М). Корпус ВИР-3 представляет собой толстостенный цилиндрический сосуд с полусферической крышкой и полусферическим дном. На рис. 1 представлена конструктивная схема корпуса АЗ реактора ВИР-3.

ВИР-3 – импульсный реактор с растворной АЗ, в котором в качестве топлива используется раствор соли высокообогащенного (90 % по ^{235}U) урана в воде (уранилсульфата). ТР залит в прочный цилиндрический герметичный корпус из нержавеющей стали 12Х18Н10Т.

Управление реактором осуществляется с помощью 8 стержней управления реактивностью, размещенных в специальных цилиндрических каналах.

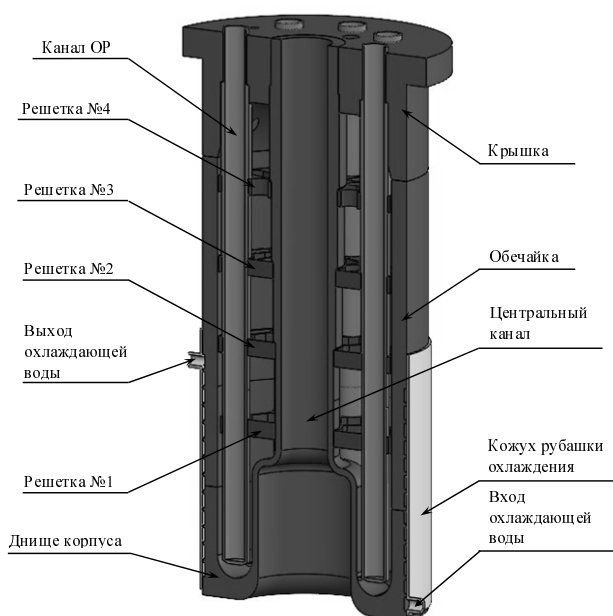


Рис. 1. Конструктивная схема корпуса АЗ реактора ВИР-3

При «выстреливании» управляющих стержней в растворе начинается цепная реакция деления ядер урана. На треках осколков деления ядер появляются микропузырьки газа (смесь водорода, кислорода и пара). В результате выделения энергии повышается давление в растворе (за счет теплового расширения ТР и выделения радиолитических пузырьков) и начинается его движение вверх, в сторону крышки корпуса.

Прочностной расчет исходной геометрии корпуса ВИР-3

Предполагаемые варианты эксплуатационных характеристик и состава АЗИЯР ВИР-3 представлены в табл. 1 и табл. 2. Определение прочностных характеристик нижней части центрального канала предполагает динамический и термомеханический расчеты.

Таблица 1

Состав АЗ ИЯР ВИР-3

№ варианта	Концентрация урана, г/л	Объем ТР, л	Доля запады-вающих нейтронов $\beta \cdot 10^3$	Время жизни нейтронов τ , мкс	Коэффициент размножения в импульсном режиме $K_{эф}$
1	56	160,2	7,28	38,16	1,0413
2	56	161,7	7,28	38,18	1,0447
3	52	169,5	7,28	40,3	1,0383
4	60	151	7,31	36,3	1,0434

Таблица 2

Эксплуатационные характеристики АЗ ИЯР ВИР-3

№ варианта	Ширина импульса, мс	Мощность, ГВт	Энерговыделение, МДж	Давление на дно, бар	Реактивность, в долях бета
1	3,49	31	121	129	5,45
2	3,15	39	137	195	5,88
3	4,09	27	120	94	5,07
4	3,09	35	120	162	5,69

Для выполнения динамического расчета прочности корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 ко дну прикладывались давления, зависящие от времени, рассчитанные с помощью специально разработанной программы. Для учета неравномерности нагружения дна по высоте, при проведении механических расчетов дно разбивалось на 30 областей (ширина каждой области составляет 10 мм), к каждой области прикладывались свои значения распределенной нагрузки. Характерная зависимость давления на дно корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 от времени, использованные в динамических расчетах, представлена на рис. 2.

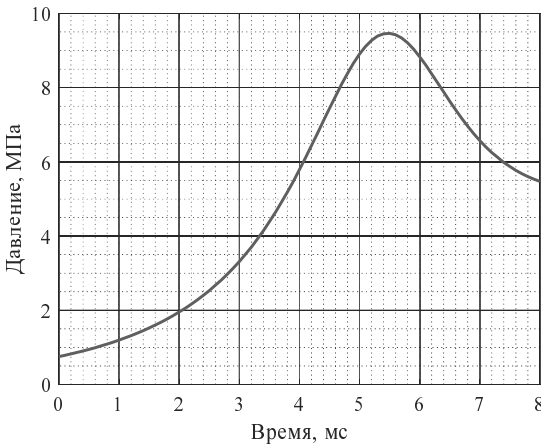


Рис. 2. Характерная зависимость давления на дно корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 от времени

Уравнения, определяющие НДС динамической системы, имеют вид (2) [4], [5]

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = R, \quad (1)$$

где: M – матрица массы, \ddot{U} – вектор ускорения, C – матрица демпфирования, \dot{U} – вектор скорости, K – матрица жесткости, U – вектор смещения, R – вектор нагрузки конечно-элементной системы.

На рис. 3 показаны точки 1, 2, 3, в которых были определены значения напряжений корпуса АЗИЯР ВИР-3. Корпус закреплен абсолютно жестко по поверхности верхнего фланца.

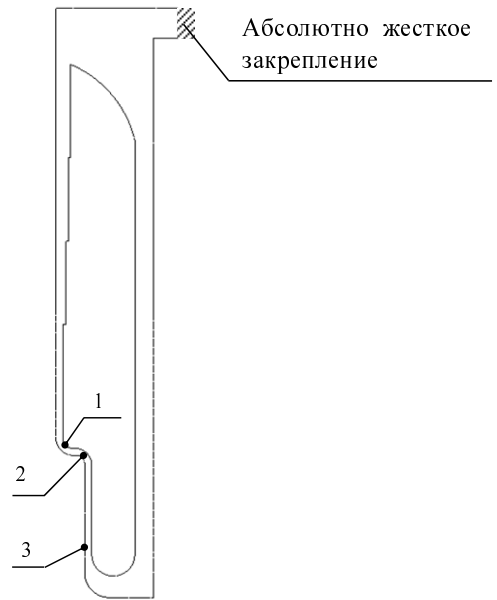


Рис. 3. Схема расположения точек 1, 2, 3 на корпусе АЗ ИЯРВИР-3 для определения значений смещений и напряжений

Динамические расчеты корпуса реактора ВИР-3 показали, что максимальные величины напряжений наблюдаются в точке 1, рис. 3. График зависимости напряжений от времени в точке 1 (область сужения центрального канала), что соответствует варианту № 3 (при концентрации урана 52 г/л и объеме ТР 169,5 л) в табл. 1 и табл. 2, показан на рис. 4.

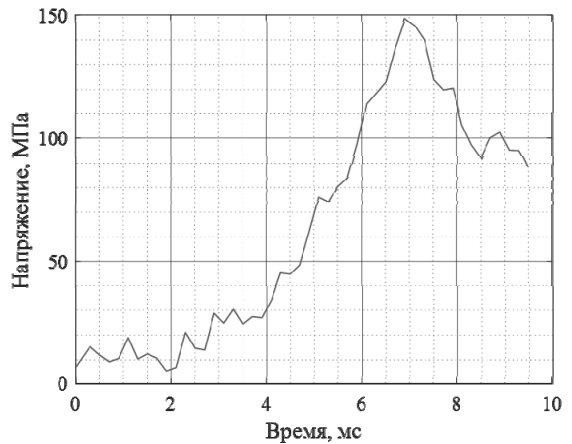


Рис. 4. Зависимость напряжения от времени в точке 1 корпуса АЗ ИЯРВИР-3

Из рис. 4 видно, что максимальные напряжения, полученные в точке 1, составляют 149 МПа, запас прочности по условному пределу текучести ($\sigma_{0,2} = 235$ МПа) составляет 1,6.

На рис. 5 показаны распределения напряжений в корпусе реактора в момент удара ТР о дно АЗ ИЯР ВИР-3.

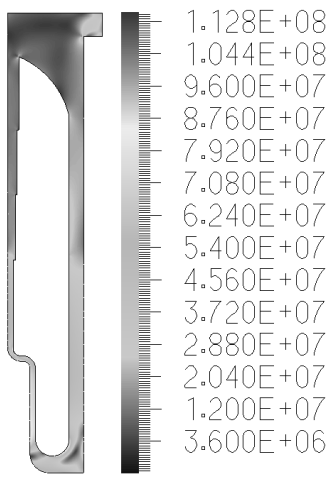


Рис. 5. Распределение эквивалентных напряжений в корпусе АЗ ИЯР ВИР-3 в момент удара (Па)

В табл. 3 представлены результаты расчетов исходной геометрии корпуса АЗИЯРВИР-3.

Таблица 3

Результаты динамических расчетов исходной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 для точек 1, 2, 3

№ варианта	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			Минимальный запас прочности по пределу текучести
	1	2	3	
1	244	180	200	1,0
2	201	125	132	1,2
3	149	90	93	1,6
4	246	154	161	1,0

Согласно требованиям СТО В Росатом 3031-2012 минимальный запас прочности по пределу текучести для динамического расчета должен составлять не менее 2. Из табл. 3 видно, что ни один из представленных вариантов необходимым требованиям не удовлетворяет. В качестве основы для оптимизации принимается вариант № 3, так как его запас прочности наиболее близок к 2.

При работе в статическом режиме корпус реактора значительно нагревается, что может привести к возникновению больших напряжений в области сужения центрального канала. Для определения напряжений, возникающих вследствие нагрева, проведены термомеханические расчеты с граничными условиями первого рода. Температуры приложены к внутренним поверхностям корпуса АЗИЯР ВИР-3, в области топливного раствора – 100 °С, что примерно соответствует мощности 15 кВт, в области буферного газа – от 20 °С до 80 °С с шагом 20 °С. Температура охлаждающей воды (теплоносителя) принята равной 20 °С. На внешних поверхностях сквозного центрального канала задано условие конвективного

теплообмена с окружающей средой. Результаты термомеханических расчетов исходной геометрии корпуса АЗ ИЯРВИР-3 в точках 1, 2, 3 представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты термомеханических расчетов исходной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 в точках 1,2,3

№ варианта	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			Минимальный запас прочности по пределу текучести
	1	2	3	
20	116	103	158	1,5
40	137	120	160	1,5
60	157	140	164	1,4
80	150	165	165	1,4

На рис. 6 представлены распределения напряжений в корпусе АЗ ИЯРВИР-3 при нагреве.

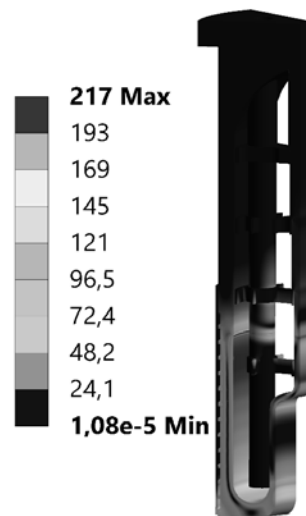


Рис. 6. Распределение эквивалентных напряжений в корпусе АЗ ИЯР ВИР-3 при нагреве (МПа)

Согласно ПНАЭ Г-7-002-86 [6] коэффициент запаса по пределу текучести для статического режима работы должен быть не менее 1.5. Анализ полученных результатов исходной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 показал, что условия прочности в полной мере не удовлетворяются.

Для обеспечения необходимых прочностных характеристик корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 разработана оптимизированная геометрия.

Расчет измененной геометрии корпуса АЗИЯР ВИР-3

Оптимизация геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 предполагает изменение изгиба в области сужения канала (увеличение радиуса скругления), в точке 1,

рис. 3, и утолщение стенки нижней части канала на 5 мм (см. рис. 7).

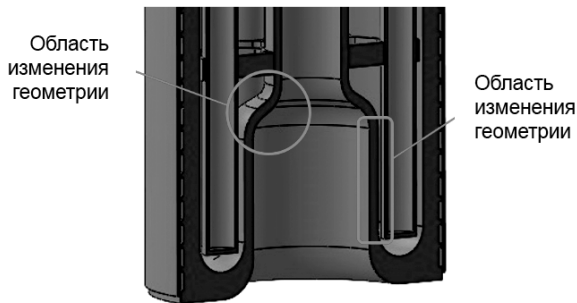


Рис. 7. Нижняя часть измененной конструкции корпуса АЗ ИЯР ВИР-3

Динамические расчеты измененной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 показали, что максимальные величины напряжений значительно снизились. График зависимости напряжений от времени в точке 1, рис. 3, (область сужения центрального канала), что соответствует варианту № 3 (при концентрации урана 52 г/л и объеме ТР 169,5 л) в табл. 1 и табл. 2, показан на рис. 8.

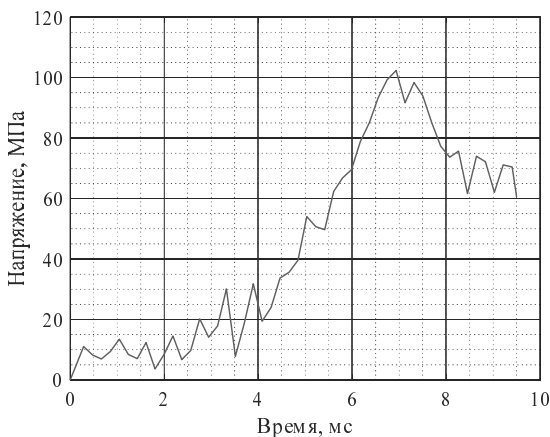


Рис. 8. Зависимость напряжения от времени в точке 1 измененной конструкции корпуса АЗ ИЯР ВИР-3

Из рис. 8 видно, что максимальные напряжения, полученные в точке 1, составляют 102 МПа, запас прочности по пределу текучести ($\sigma_{0,2} = 235$ МПа) составляет 2,3.

На рис. 9 показаны распределения напряжений в корпусе АЗ ИЯР ВИР-3 в момент удара ТР о дно АЗ ИЯР ВИР-3.

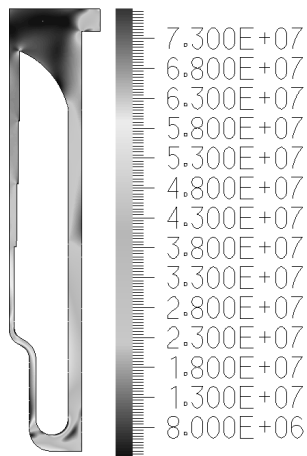


Рис. 9. Распределение эквивалентных напряжений в корпусе АЗ ИЯР ВИР-3 в момент удара (Па)

В табл. 5 представлены результаты расчетов измененной конструкции корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 в точках 1,2,3, рис. 3.

Таблица 5

Результаты динамических расчетов измененной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 для точек 1,2,3

№ варианта	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			Минимальный запас прочности по пределу текучести
	1	2	3	
1	216	172	173	1,1
2	148	115	119	1,6
3	102	79	84	2,3
4	178	139	145	1,3

Из табл. 5 видно, что только вариант № 3 (при концентрации урана 52 г/л и объеме ТР 169,5 л) удовлетворяет требованиям.

Результаты термомеханических расчетов измененной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 в точках 1, 2, 3, рис. 3, представлены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты термомеханических расчетов измененной геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 для точек 1, 2, 3

Температура буферного газа, °С	Максимальные эквивалентные напряжения, МПа			Минимальный запас прочности по пределу текучести
	1	2	3	
20	93	74	153	1,5
40	107	87	156	
60	120	103	158	
80	143	126	160	

Анализ результатов термомеханических расчетов (см. табл. 6) показал, что возникающие напряжения в результате нагрева находятся в допустимых пределах. Согласно ПНАЭ Г-7-002-86 [6] при такой конфигурации геометрии корпуса АЗ ИЯР ВИР-3 условия прочности выполняются.

Заключение

В данной работе разработана цифровая модель корпуса АЗ ИЯРВИР-3 и проведен анализ НДС корпуса под воздействием импульсных и тепловых нагрузок.

Анализ результатов прочностных расчетов исходного корпуса АЗ ИЯРВИР-3 показал, что:

– исходная геометрия корпуса условиям прочности не удовлетворяет для всех вариантов эксплуатационных характеристик реактора;

– нагрев корпуса в статическом режиме работы вызывает большие (выше допускаемых) напряжения в нижней части центрального канала.

Предложены пути оптимизации геометрии центрального канала и подобран оптимальный режим работы, при которых выполняются условия прочности.

Анализ результатов прочностных расчетов измененной геометрии корпуса АЗ ИЯРВИР-3 показал, что:

– увеличение радиуса скругления в месте сужения канала положительно влияет на возникающие напряжения, вследствие нагрева;

– увеличение толщины стенки в нижней части канала, совместно с увеличением радиуса скругления в месте сужения канала, приводит к снижению напряжений, до допустимых значений.

Список литературы

1. Колесов В. Ф., Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Смирнов И. Г., Воинов М. А., Девяткин А. А., Кошелев А. С., Нарожный А. Т., Никитин И. А., Хоружий В. Х. Критические стэнды и импульсные реакторы РФЯЦ-ВНИИЭФ. // Физика и техника высоких плотностей энергии. Вып. 1. С. 136–164.

2. Воинов А. М., Колесов В. Ф., Матвеев А. С. и др. Водный импульсный реактор ВИР-2М и его предшественники // ВАНТ. Серия: Физика ядерных реакторов. 1990. № 3. С. 3–15.

3. Харитон Ю. Б., Воинов А. М., Колесов В. Ф. и др. Аperiodические исследовательские импульсные реакторы. Вопросы современной экспериментальной и теоретической физики. Л.: Наука, 1984. С. 103–119.

4. Биргер И. А., Мавлюков Р. Р. Сопротивление материалов: Учебное пособие. Изд. 2-е. М.: ЛЕНАНД, 2015. С. 560.

5. Галлагер Р. Методы конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. С. 428.

6. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. М.: Энергоатомиздат, 1989. С. 525.