

УДК 539.3+621.039

Ю. В. Верюжский, П. А. Синева, С. В. Кошкин, В. В. Саркисов  
МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ РБМК 1000 НА СТАДИИ ЗАПРОЕКТНОЙ  
АВАРИИ

Демонстрируется применение разработанных средств численного моделирования разрушения конструкций реактора 4-го энергоблока ЧАЭС при запроектной аварии с использованием достоверных фактов о промежуточных и итоговых состояниях конструкций в качестве основы для верификации полученных результатов.

Анализ процесса запроектной аварии реактора 4-го энергоблока ЧАЭС является ключевым звеном комплексных исследований разрушений и повреждений конструктивной системы этого строительного сооружения и его технологического оборудования. Однако до настоящего времени анализ аварии 1986 г. проводился, в основном, с позиции воспроизведения хронологии и общего описания этапов аварийного процесса для технологической атомной энергетической системы [1-10], а не как объекта исследования прикладной механики.

Данная статья ставит целью разработку и применение средств численного моделирования последовательности разрушения конструкций реактора с использованием достоверных факторов о промежуточных и итоговых состояниях конструкций в качестве основы для верификации полученных результатов [11-13]. Авторы не пытаются воссоздать полную картину аварии, а только используют некоторые известные на сегодняшний день гипотезы и версии [1-10, 14-19] для разработки моделей и методики анализа разнообразных вероятных сценариев аварии, получения оценочных значений воздействий и на их основе проведения расчета на разрушение металлоконструкций (МК) реактора и технологического канала (ТК).

С целью возможности распространения разработанной методики для моделирования протекания гипотетических запроектных аварий при анализе безопасности действующих реакторов рассматривались конструктивные схемы как первой, так и второй очереди строительства энергоблоков ЧАЭС. Эти сооружения различаются, прежде всего, конструкциями аварийных паросбросных систем. В частности, в отличие от энергоблоков первой очереди в структуре энергоблоков второй очереди существенную роль играют бассейн-барбатер и связанные с ним элементы парораспределительных коммуникаций и коридоров. Эти конструктивные различия значительно изменяют характер процессов

© Ю. В. Верюжский, П. А. Синев, С. В. Кошкин, В. В. Саркисов, 1998

29

моделей и методики анализа разнообразных вероятных сценариев аварии, получение оценочных значений воздействий и на их основе проведение расчета на разрушение металлоконструкций (МК) реактора и технологического канала (ТК).

С целью возможности распространения разработанной методики для моделирования протекания гипотетических запроектных аварий при анализе безопасности действующих реакторов рассматривались конструктивные схемы как первой, так и второй очереди строительства энергоблоков ЧАЭС. Эти сооружения различаются, прежде всего, конструкциями аварийных паросбросных систем. В частности, в отличие от энергоблоков первой очереди в структуре энергоблоков второй очереди существенную роль играют бассейн-барбатер и связанные с ним элементы парораспределительных коммуникаций и коридоров. Эти конструктивные различия значительно изменяют характер процессов моделируемых запроектных аварий вследствие различия параметров силовых и температурных динамических нагрузок, а также физико-механических и геометрических представлений исследуемых элементов реакторов.

Упрощенные модели разрабатываются в рамках общих конструктивных схем реакторов. В глобальных моделях выделяются основные несущие элементы и связи между ними. Вводятся рациональные упрощения подконструкций, исходя из возможности уменьшения трудоемкости вычислений без снижения их точности. При необходимости качества глобальные модели уточняются на уровне локальных фрагментов и узлов.

Для численного исследования объектов в статической и динамической постановках используются численно-аналитический метод потенциала и метод конечных элементов. В дискретных моделях применяются стержневые, плоские и объемные элементы в рамках теорий статической и динамической термоупругости, устойчивости и разрушения.

В ходе расчета определяется напряженно-деформированное состояние (НДС) МК, которое оценивается по четвертой теории прочности [20]. Критерием является удельная потенциальная энергия формоизменения, записываемая через эквивалентные напряжения.

Подробное описание исходных данных и расчетов представлено в [11, 12].

**Конструктивная схема.** Для расчетов применяются упрощенные модели, созданные на основе общих конструктивных схем МК реакторов энергоблоков до запроектной аварии, которая разделяется на основные элементы (схемы) Е, Л, Д, КЖ, ОР, С [21, 22]. Здесь остановимся только на кратком описании МК, взаимосвязях между ними, нагрузках, влияющих на расчетную модель конструкции реактора. Один из вариантов исследуемой конструктивной структуры представлен на рис. 1. Здесь элементы нижней опорной части условно не показаны.

Для изготовления МК реактора в основном использовалась сталь 10ХСНД, физико-механические характеристики которой приведены в [23].

Схема Е представляет собой цилиндрическую сварную конструкцию, состоящую из верхней и нижней плит, выполненных из перфорированных листов толщиной 40 мм, обечайки и сетки внутренних вертикальных ребер жесткости толщиной 40 мм. Кроме того, в ней расположены тракты технологических каналов и другие металлоконструкции, придающие ей значительную дополнительную жесткость. Схема Е воспринимает нагрузку от

30

вышележащих схем и передает ее с помощью 16 катковых опор на схему Л. На схему Л также опирается составная цилиндрическая схема Д. Схемы ЛТ и Д представляют собой полые сварные цилиндры, разделенные на 16 вертикальных герметичных отсеков с

толщиной стенок 30 мм, внутри которых расположены ребра жесткости толщиной 30 мм. К нижней решетке схемы Е приварен верх МК схемы КЖ. Снизу КЖ приварена к верхней решетке схемы ОР, сварка произведена с предварительным натягом. Схема ОР представляет собой металлоконструкцию, аналогичную схеме Е. Она воспринимает нагрузку от элементов активной зоны реактора и передает ее на схему С. Схема С собирается с помощью фланцевых болтовых соединений из балок-стоек толщиной 40 мм, расположенных по двум взаимно перпендикулярным плоскостям в виде креста. Ребра жесткости также имеют толщину 40 мм. Нижняя часть схемы С опирается на закладные части ее фундамента. Верхний торец схемы С имеет выступы и подогнан по поверхности контакта с нижней плитой схемы ОР. Основные габариты схем приведены на рис. 1.

К схеме Е относятся верхний и нижний горизонтальные компенсаторы, обеспечивающие температурные расширения при сохранении герметичности гелий-азотных и азотных полостей. Компенсаторы не являются силовыми деталями. В схеме КЖ, окружающей активную зону, также предусмотрен компенсатор, позволяющий убрать монтажные и осевые температурные напряжения, возникающие в процессе эксплуатации. Пространство между внутренним цилиндром схемы Л и схемой КЖ заполнено азотом, давление которого превышает давление гелий-азотной смеси внутри КЖ на 0,2-1,2 кПа. Схемы Л и Д заполнены водой (биологическая защита), а схемы Е и ОР - серпентинитовой засыпкой (плотность 1,7 т/м<sup>3</sup>). Монтажное пространство, образованное внешним цилиндром схем Л и Д и бетонной шахтой, заполнено песчано-гравийной засыпкой (плотность 1,3-1,6 т/м<sup>3</sup>), которая служит дополнительной биологической защитой.

Корпус ТК представляет собой сварную конструкцию, состоящую из трех частей. Средняя часть состоит из трубы, изготовленной из сплава Zr + 2,5 % Nb, с наружным диаметром 88 мм и толщиной 4 мм. Верхняя и нижняя концевые части изготовлены из коррозионно-стойких труб (сталь 08X18H10T) различных диаметров. Соединение средней и концевых частей корпуса канала производится с помощью специально разработанных переходников сталь-цирконий. Характеристики материалов и конструкции ТК принимаются по [23, 24].

Связь ТК со схемами Е и ОР осуществляется вваренными в них трубами-трактами. В верхнем тракте (схема Е) ТК крепится с помощью упорного бурта и усикового сварного шва, в нижнем (схема ОР) - соединяется с помощью сварки с трубой-трактом металлоконструкции схемы ОР через узел сильфонного компенсатора. Это соединение позволяет компенсировать различия в температурных расширениях ТК и металлоконструкций реактора, а также создать надежную герметизацию газовой полости.

**Расчетные модели.** На основании описанной выше конструктивной схемы реактора сформированы его расчетные схемы.

Из конструктивной схемы следует независимость конструкций Е, Л и Д от ОР и С. Связующими звеньями между ними являются конструкции схемы КЖ, технологические каналы и компенсаторы. КЖ и компенсаторы являются, в основном, изолирующими деталями и воспринимают незначительные внешние нагрузки. Схема КЖ снабжена компенсатором, который снижает температурные напряжения вдоль оси КЖ и возможную

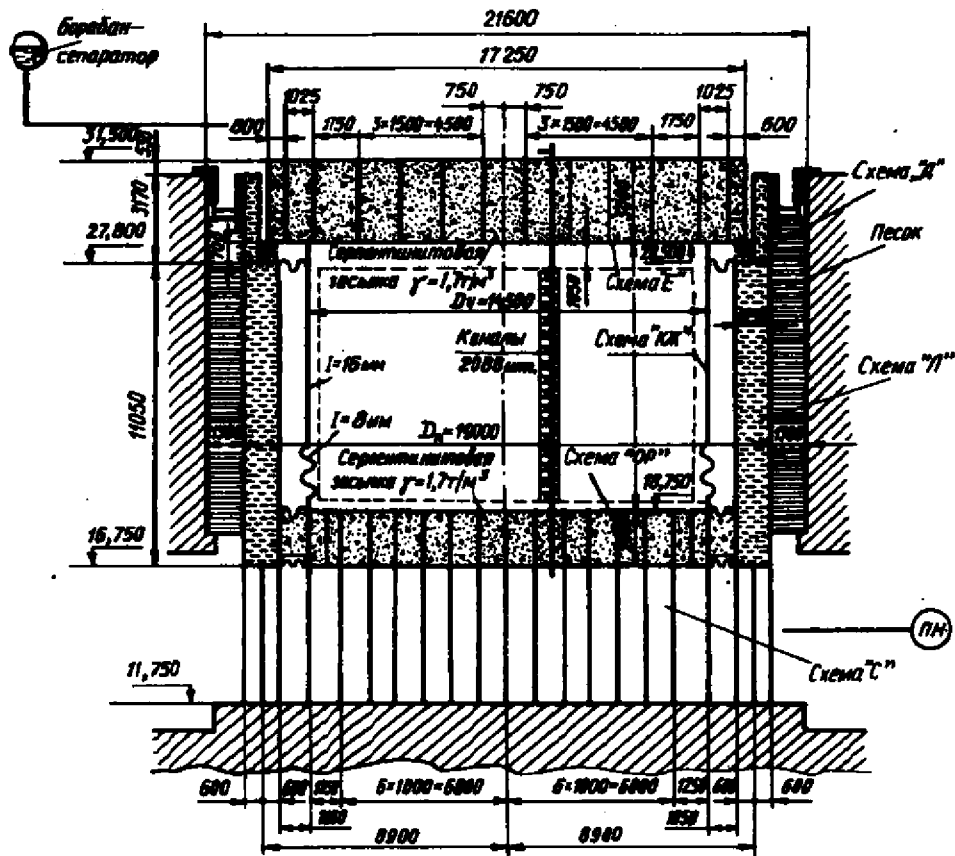


Рис. 1. Конструктивная схема реактора

передачу усилий от Е к ОР, к которым она приварена. Связь каждого технологического канала с ОР осуществляется в тракте через узел сильфонного компенсатора. Под действием температуры ТК свободно расширяются по длине и не оказывают значительного влияния на схему ОР, а следовательно и не передают усилий от схемы Е на ОР.

Представленное описание реализуется в двух независимых расчетных схемах Е+Л+Д, ОР+С и отдельных схемах для ТК и КЖ.

Первая расчетная схема: металлоконструкция схемы Е с действующими на нее нагрузками (вес от лежащего выше плитного настила и другого технологического оборудования, температура сверху  $290\text{ }^{\circ}\text{C}$  и снизу  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) опирается на схему Л через 16 односторонних опор, действующих вдоль оси реактора. На схеме Л сверху расположена схема Д, между ними осуществляется полный контакт. Обе схемы внутри заполнены водой с температурой до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что позволяет не учитывать в расчетах температурные напряжения. Схема Л местами опирается на фундаментальные конструкции

Вторая общая расчетная схема: металлоконструкция схемы ОР с действующими на нее нагрузками (вес активной зоны 2000 т, вес схемы ОР 1000 т, температура сверху  $350\text{ }^{\circ}\text{C}$  и снизу  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) расположена на схеме С, которая, в свою очередь, опирается через закладные детали на фундаментные конструкции. Температуру схемы С полагаем постоянной по высоте и равной  $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Геометрически обе расчетные схемы с учетом расположения фундамента имеют две плоскости симметрии. Поэтому в случае задания симметричного нагружения в расчетах используются их четверти или половины, а в случае несимметричного нагружения рассматриваются целиком. По плоскостям симметрии задаются граничные условия, учитывающие симметрию.

При моделировании конструкций упрощено расположение внутренних ребер жесткости. Они располагаются равномерно по всему внутреннему пространству, кроме того, реальная жесткость трактов ТК и вспомогательных элементов учитывается увеличением толщин ребер и плит.

Геометрические параметры схемы КЖ: толщина стенки 16 мм, а в месте компенсатора - 8 мм, диаметр - 14,5 м. В качестве расчетной схемы принимаем цилиндрическую оболочку, нагруженную наружным давлением 1,2 кПа.

Принята осесимметричная расчетная схема ТК. Рассматривается действие температур и давлений на внутреннюю и наружную поверхности. Внутренний диаметр 80 мм, наружный - 88 мм. При технологическом режиме работы давление внутри 7 МПа, температура внутри 265 °С, - снаружи 325 °С.

**Расчет на технологические нагрузки** выполнялся для апробации расчетных схем, моделирующих МК реактора при запроектной аварии. Приведем выводы расчетов на прочность [17, 18] в виде полученного максимального эквивалентного напряжения и допустимого минимального значения предела текучести материала при рабочей температуре [21]: для схемы Е - 194 и 314 МПа; для схем Л и Д - 94 и 353 МПа; для схемы ОР - 224 и 314 МПа; для схемы С - 111 и 314 МПа; для схемы КЖ - 1,09 и 314 МПа; для ТК: в стальной части 187 и 187 МПа, в циркониевой 88 и 196 МПа. Следовательно, при технологическом режиме работы все основные МК реактора имеют достаточный запас прочности.

Для схемы С выполнен расчет на устойчивость. Исходные данные для расчетов приняты те же, что и при расчете на прочность. Учитывается влияние металлоконструкции схемы ОР, которая моделируется в виде жесткой горизонтальной пластины. В местах контакта ОР и С в соответствии с методикой расчета на устойчивость прикладываются единичные силы. По низу схемы моделируются линейные перемещения, задаваемые из расчетов податливости нижней опорной подконструкции.

На рис. 2 представлена форма потери устойчивости. Критическая сила, полученная из расчета, равна 946 МН, а прикладываемая нагрузка 30 МН, следовательно, схема С имеет значительный запас устойчивости.

**Запроектная авария.** Для отработки разрабатываемой методики исследований и анализа качества построенных моделей реакторов использовались различные (полные или фрагментарные) варианты протекания гипотетических аварий. Представлена одна из возможных хронологий развития разрушения реактора, которая составлена из рассмотрения ряда сценариев запроектной аварии [9, 10, 19].

Авария начинается с разрушения части ТК в юго-восточном квадранте, которое было вызвано изменением температурного режима. Ориентировочным местом начала разрушения ТК является переходник - место стыка циркониевой и стальной труб. После разрушения первых ТК рост давления в реакторном пространстве приводит к разрыву

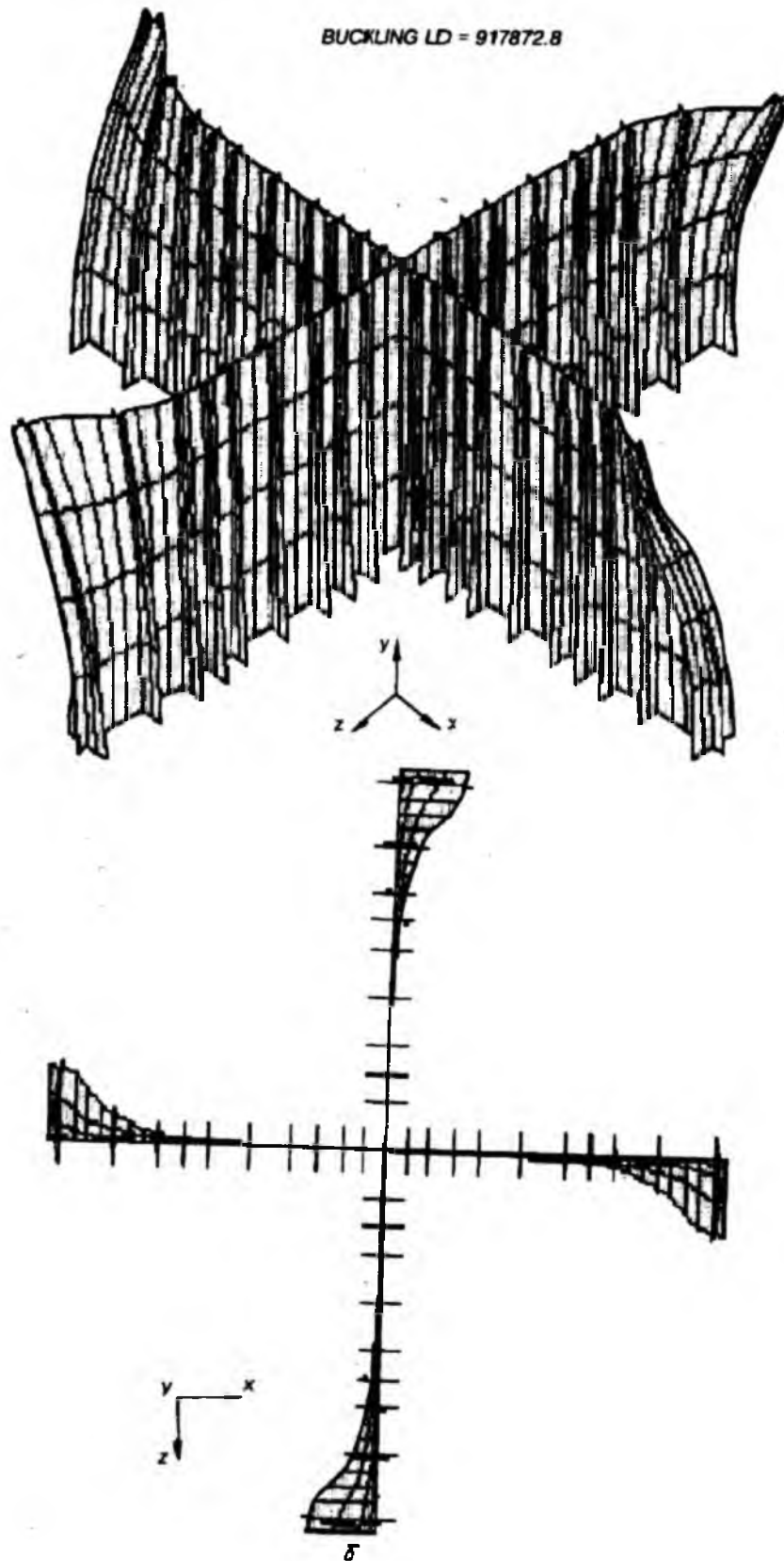


Рис. 2. Форма потери устойчивости схемы С

металлоконструкции схемы КЖ, который начнется также с юго-восточного квадранта. Пар попадает в межреакторное пространство и воздействует на металлоконструкции схемы Л. В первый момент появления пара давление действует на часть Л, соответствующую юго-восточному квадранту, затем распространяется на всю поверхность Л. Одновременно с этим растет давление на схему ОР, вначале в юго-восточном квадранте, затем на всю площадь верхней плиты ОР. Возможно частичное разрушение схемы ОР, полное разрушение

компенсаторов между схемами и выход пара в подреакторное пространство. После разрыва КЖ начинается подъем активной зоны, схемы Е и дальнейший разрыв ТК.

Схема С воспринимает дополнительные нагрузки, передаваемые через схему ОР, а в случае выхода пара в подреакторное пространство при разрушении диафрагм между схемами ОР и Л подвергается давлению на части поверхности. Это давление может возникнуть и в результате возгорания различных газов в подреакторном пространстве [9]. Если в технологическом режиме мы полагали, что схема С не подвергается значительному перепаду температур, то в результате аварии такой перепад может возникнуть.

Подъем схемы Е вместе с АЗ приводит к разрыву верхних коммуникаций. При достижении высоты около 14 м [10] происходит второй взрыв, после которого схема Е падает на схему Л.

Для рассматриваемого варианта развития аварии в [12] получены ориентировочные максимальные значения давлений в активной зоне, равные 1,7-2,5 МПа. Рост давления происходит достаточно «медленно» за время порядка десятых долей секунды, поэтому рассматриваемые МК можно моделировать в квазистатической постановке, обоснование которой и определение коэффициентов перегрузки выполнено в [12] на основе динамических расчетов.

Анализ возможных ситуаций развития аварии выполняется на тех же моделях, что и при расчете на технологические нагрузки.

Ниже на рисунках представлены результаты расчетов в виде муаровых картин эквивалентных напряжений. Картины снабжены соответствующей градацией значений напряжений в мегапаскалях. Для наглядности результаты показаны на деформированных схемах, полученных путем масштабирования в сторону увеличения значений перемещений узлов без изменения масштаба габаритов конструкций.

**Технологические каналы (ТК).** Исходя из предположения, что при запроектной аварии внутри канала происходил рост температуры, определяли значения внутренних температур, при которых происходит разрушение стальной и циркониевой труб и переходного соединения, оставляя при этом значение наружной температуры на технологическом уровне (325 °С). Взаимодействие с графитом и учет коррозии ТК представлены в работах [25, 26].

В качестве предельных температур принимались такие, при которых значения эквивалентных напряжений будут больше значения предела временного сопротивления, для стали равного 382 МПа, а для циркония - 294 МПа.

В результате расчета оказалось, что разрушение начнется в месте переходника при температуре внутри ТК около 485 °С. В дальнейших расчетах использовались методика на разрушение [12], которая выполнялась путем итераций. На каждом шаге итерации анализировали НДС на основе выбранного критерия (минимальный предел временного сопротивления), разрушенные элементы или связи между элементами убирали и задача пересчитывалась заново. На рис. 3, а-и показаны осесимметричная расчетная схема и

35

картины напряженно-деформированного состояния, характеризующие процесс разрушения переходного соединения. Процесс разрушения начинается в нижней части переходного соединения в месте контакта стальной и циркониевой труб (рис. 3), и далее развивается вдоль линии контакта в стальной части. Здесь видно раздутие технологического канала, которое может привести к его заклиниванию в графитовой кладке. Последняя стадия разрушения переходного соединения и образование щели, через которую вырывается пар в АЗ, представлена на рис. 3, з, и.

**Схема КЖ.** На схему действуют давление азота в межреакторном пространстве 1,2 кПа и давление пара в реакторном пространстве. Наиболее слабым местом является компенсатор.

Определено внутреннее давление из условий прочности КЖ в месте компенсатора, которое составило 0,52 МПа. Оценка давления выполнена сверху, так как на прочность схемы сильно влияет задаваемый график набора давления внутри АЗ [12].

**Схема Л.** При попытке восстановить последовательность событий, происходивших во время аварии, можно использовать ряд фактов, достоверность которых считается установленной. Учтем, что МК схемы Л остались целыми, кроме того, в них даже сохранилась вода [9]. Отсюда следует, что пороговое значение, при котором МК схемы Л разрушаются, при аварии не было достигнуто. Поэтому задача об определении максимального давления, которое способно выдержать конструкции схемы Л, представляет собой значительный интерес.

При расчете схемы Л на запроектную аварию, кроме технологических нагрузок, рассматривалось несколько вариантов аварийного воздействия на внутреннюю стенку [12]. Выделим два из них: распределенное давление по высоте на всю стенку, равное 2,5 МПа; распределенное давление по высоте на юго-восточную четверть, равное 2,5 МПа.

В результате расчета получено максимальное значение эквивалентных напряжений, по первому варианту равное 417 МПа, по второму - 671 МПа при минимальном значении временного сопротивления при температуре 100 °С - 481 МПа. Так как давление действовало на схему Л некоторым нерегулярным образом, не соответствующим ни первой, ни второй схеме, то можно предположить, что давление в реакторном пространстве не превышало 2,5 МПа.

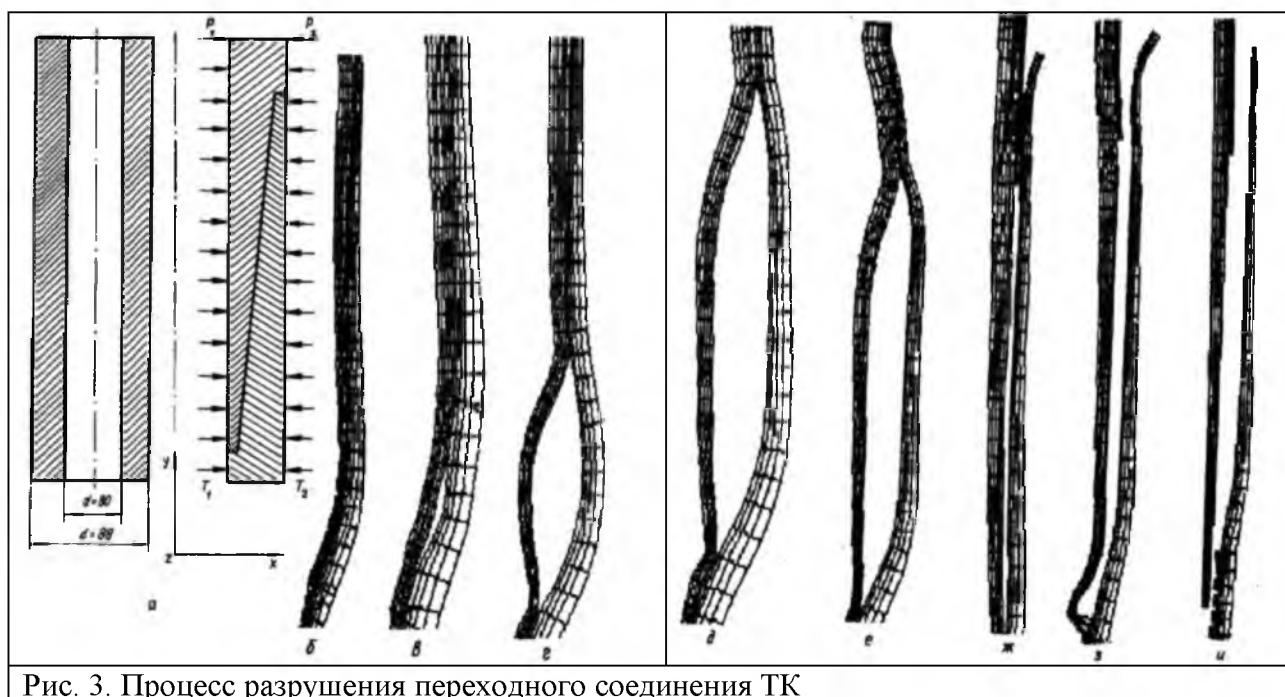


Рис. 3. Процесс разрушения переходного соединения ТК

36-37

**Схема ОР.** При расчете МК схемы на различные варианты нагружений, вызванные запроектной аварией, выбирались те, которые дают возможность оценить величину нагрузки, необходимую для того, чтобы металлоконструкция схемы ОР изменила свое проектное положение или была частично разрушена [12].

Представим два из них. В обоих вариантах нагружения действуют технологические нагрузки, дополнительное давление на верхнюю плиту величиной 2,5 МПа, а температура увеличена до 400 °С. Однако в первом варианте дополнительная нагрузка приложена по всей поверхности верхней плиты, во втором - в юго-восточной четверти. В качестве критерия оценки НДС использовался предел временного сопротивления стали 461 МПа. Сопоставляя это значение со значениями напряжений, возникающими в конструкции при рассматриваемых нагружениях, можно отметить следующее:

при нагружении верхней плиты схемы распределенным по всей площади давлением и температурой 400 °С нарушение целостности конструкции может наступить в момент, когда величина давления составит порядка 1,9 МПа;



при нагружении одной четверти верхней плиты избыточным давлением и повышении в этом квадранте температуры для разрушения конструкции в рассматриваемом месте необходимо давление величиной 2,1 МПа.

**Схема С.** Расчет МК схемы С соответствует расчету схемы ОР, но при этом возникают дополнительные варианты нагружения, связанные с прорывами газов в подреакторное пространство.

При некоторых сценариях аварии возможно нарушение температурного режима схемы С, что моделировалось перепадом температуры по ее высоте в 220 °С. При проникновении пара или газов в подреакторное пространство возникают моменты, когда давление действует на плоскости двух из четырех ветвей схемы. Для анализа результатов использовался предел временного сопротивления 471 МПа.

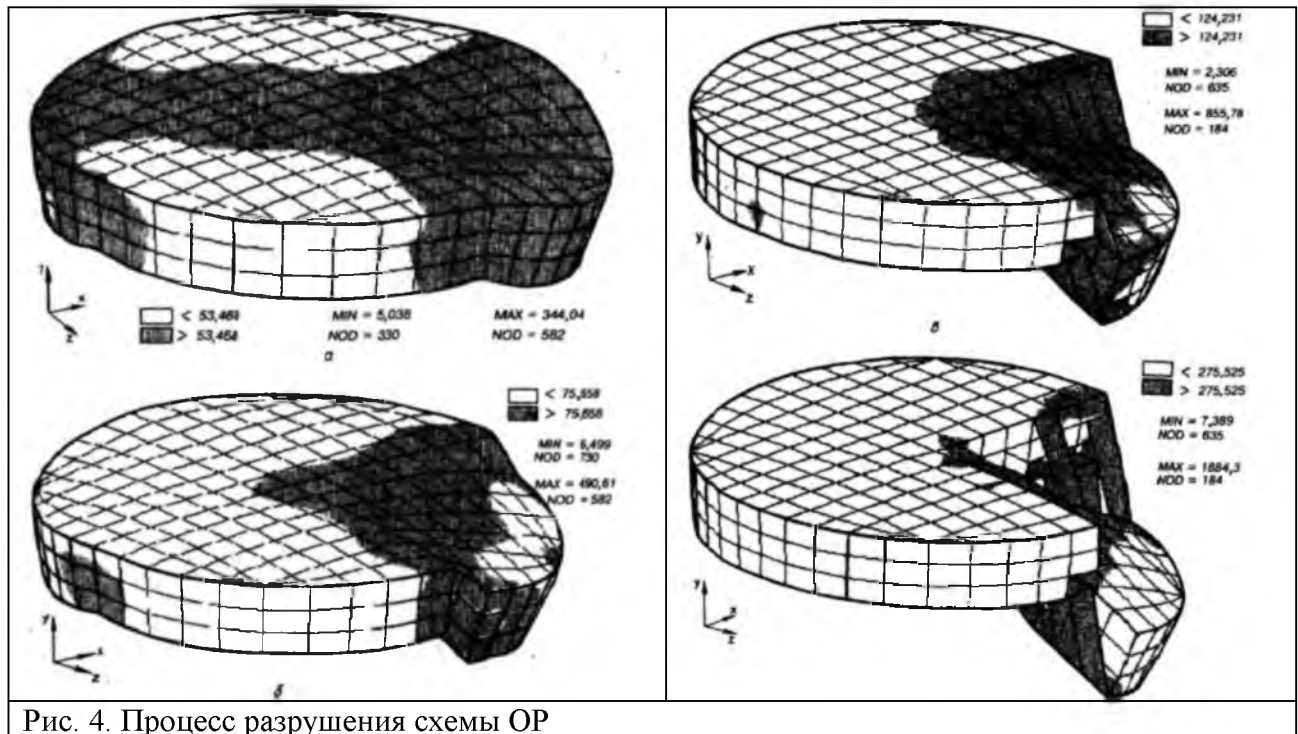


Рис. 4. Процесс разрушения схемы ОР

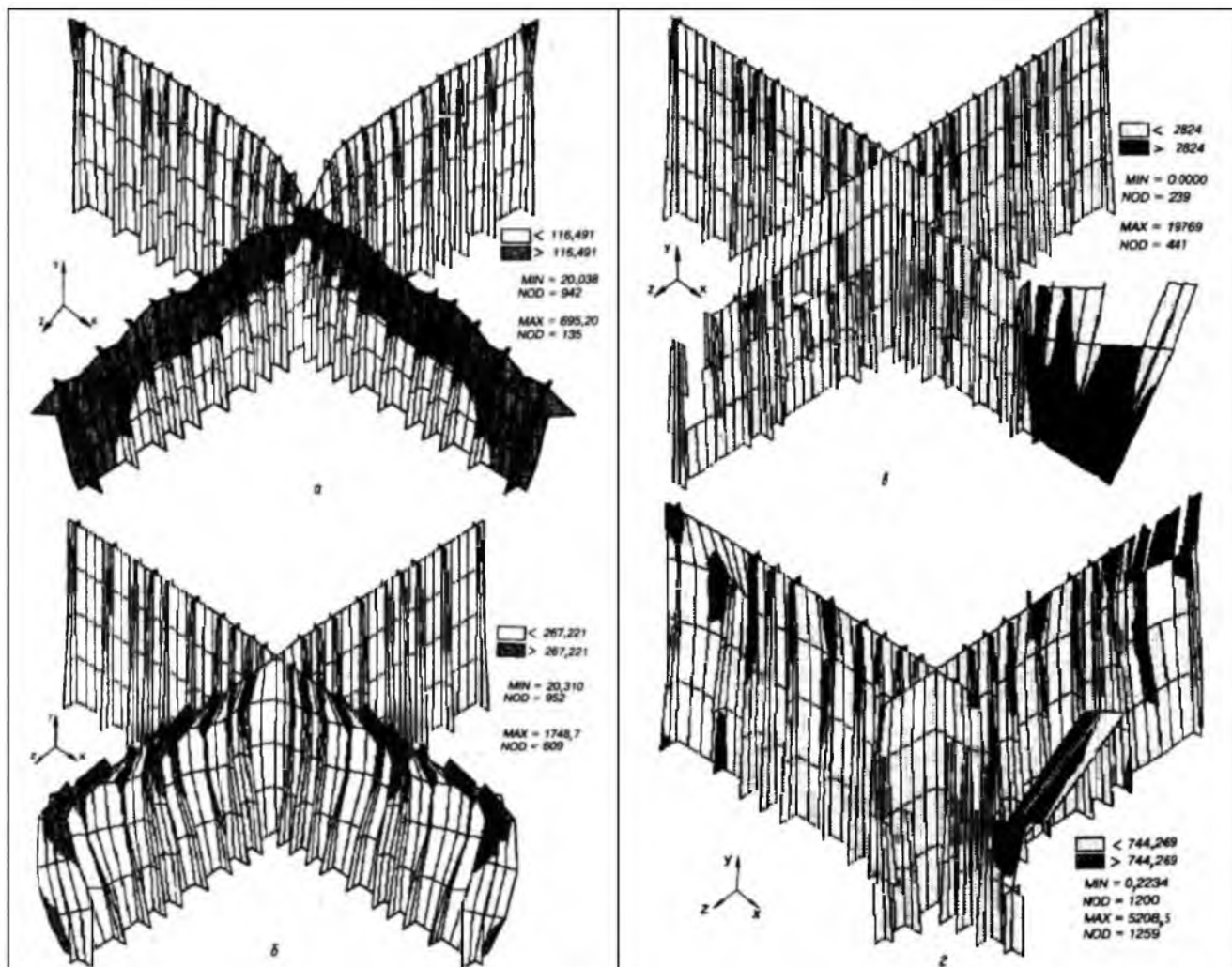


Рис. 5. Процесс разрушения схемы С

40-41

Выполненные в [12] расчеты для схемы С позволяют заметить следующее:  
 при моделировании повышенного давления 2,5 МПа на схему ОР максимальные эквивалентные напряжения в схеме С составляют 695 МПа, т. е. начинается ее разрушение;  
 при моделировании перепада температуры по высоте схемы С максимальные эквивалентные напряжения составляют 563 МПа, что вызывает ее разрушение;  
 влияние давления в подреакторном пространстве резко ухудшает НДС схемы С и приводит к ее разрушению при давлениях порядка 0,5 МПа.

При расчете на устойчивость схемы С величина критической силы составляет 946 МН, что превосходит суммарную нагрузку на схему С, равную 440 МН при давлении в АЗ 2,5 МПа.

В качестве еще одного примера анализа рассмотрим возможный вариант разрушения схем ОР и С, в котором учитывается совместное действие давления и температуры.

В первый момент на схемы действуют технологические нагрузки. Затем к ним в юго-восточной четверти добавляется давление пара, которое растет до 2,5 МПа. В результате пар прорывается в подреакторное пространство и действует на схему С. Расчет выполняется по итерациям. На каждом шаге расчета (итерации) после корректировки расчетной схемы и воздействий на нее задача пересчитывается вновь до стабилизации результатов. Часть результатов приведена на рис. 4, 5, на которых представлены на деформированных схемах отдельные шаги расчета с картинками эквивалентных напряжений. Показаны возможность разрушения в юго-восточном квадранте схемы ОР и разрушение схемы С на стадии запроектной аварии.

Основным результатом является отработка методики расчета конструкций реактора на разрушение при анализе целостной конструктивной модели реактора на события, составленные из рассмотрения ряда сценариев запроектной аварии. Согласно этой модели

относительно автономными являются МК схем Е, Л и Д, с одной стороны, и ОР и С, с другой.

Представленные результаты расчетов демонстрируют возможности методики и численные средства их реализации с количественным уточнением некоторых характеристик аварии [9, 10]:

подтверждена вероятность разрушения ТК в районе переходника; получена оценка сверху для давления, разрушающего компенсатор схемы КЖ - 0,52 МПа;

получена оценка максимального давления в реакторном пространстве из условия целостности схемы Л - 2,5 МПа;

показано, что это давление и повышение температуры на верхней плите схемы ОР может привести к нарушению целостности МК схемы ОР в юго-восточном квадранте и разрушениям МК схемы С.

Разработанные методика и модели могут быть полезны при качественном и количественном анализе различных версий протекания аварии 26 апреля 1986 г.

42

1. *Авария на Чернобыльской АЭС и ее последствия. (Информация, подготовленная для совещания экспертов МАГАТЭ):* Вена, 25-28 августа 1986 г. - Ч. 1. Обобщенный материал. ГК ИЭА СССР, 1986, авг. - С. 4-21.
2. *Ishikawa M., Schiozawa S., Wakabayshi T. et al. An Examination of the Accident Scenario in the Chernobyl Nuclear Power Station // Nucl. Safety.* - 1987. - 28. - N 4. - P. 448-454.
3. *Soviets change RBMK control rod design... // Nucl. Engng. Intern.* - 1987. - 32. - N 400. - P. 9.
4. *Kirchner G., Noack C. Core history and Nuclide Inventory of the Chernobyl Core at the Time of Accident // Nucl. Safety.* - 1988. - 29. - N 1. - P. 1-5.
5. *Fletcher C., Chambers R., Balandes M., Dallman R. Simulation of the Chernobyl Accident // Nucl. Engng. Design.* - 1988. - 105. - N 2. - P. 157-172.
6. *Wakabayshi T., Havamizu Y., Kitahara T. Analysis of the Chernobyl Reactor Accident (11) // Nucl. Engng. Design.* - 1988. - 106. - N 2. - P. 163-178.
7. *Адамов Е. О., Василевский В. П., Ионов А. И. и др. Анализ первой фазы развития аварийного процесса на четвертом блоке Чернобыльской АЭС // Атомная энергия.* - 1988. - 64. - Вып. 1. - С. 24-28.
8. *Оценка механических разрушений на 4-м блоке ЧАЭС: (Отчет по НИР) - ИАЭ им. И. В. Курчатова.* - Москва, 1989 г.
9. *Хронология процесса развития последствий аварии на 4-м блоке ЧАЭС и действия персонала по их ликвидации // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» (1-й этап) по х/д № 100/89.* - Чернобыль - Киев, 1990. - 167 с.
10. *Эдвард Э. Пурвис III и МНТЦ «Укрытие». Сценарий Чернобыльской аварии по состоянию на апрель 1995 г. - НАН Украины, МНТЦ «Укрытие», Чернобыль.* - 1995. - 147 с.
11. *Дополнительная экспертиза состояния строительных конструкций укрытия аварийного блока ЧАЭС // Отчет по НИР, НИИМБП по договору № 5 от 14.01.94 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Киев, 1995. - 9 кн.
12. *Исследование и численное моделирование надежности ответственных конструкций, фунтов и фунтовых вод основания объекта «Укрытие» // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по теме 1.1 / Руководитель темы Ю. В. Верюжский.* - Кн. 4: Начальная стадия аварии Чернобыльской АЭС. Расчет металлоконструкций и технологического оборудования реактора на эксплуатационные и запрельные аварийные нафузки. - № ГР 0195U003875. - Чернобыль - Киев, 1995. - 380 с. - 14 кн.
13. *Отчет по безопасности (оценке риска) объекта «Укрытие» реактора № 4 Чернобыльской АЭС // Отчет по НИР, МНТЦ «Укрытие» по ген. договору 1/95, тема 4. - Арх. № 3501. - Чернобыль - Киев, 1995. - 291 с.*
14. *Габараев Б. А., Миронов Ю. В., Новосельский О. Ю. и др. Динамика давления в реакторном пространстве РБМК // Атомная энергия.* - 1990. - 69. - Вып. 4. - С. 253-255.
15. *Расчетный анализ начальной стадии аварии на Чернобыльской АЭС / А. А. Абагян, И. М. Аршавский, В. М. Дмитриев и др. - Атомная энергия.* - 1991. - 71. - Вып. 4. - С. 275-287.
16. *Безбатченко И. И., Котельников Г. А., Нефедова Л. И. и др. Моделирование аварии на ЧАЭС // Атомная техника за рубежом.* - 1992. - 12. - С. 3-11.
17. *Миронов Ю. В., Никитин Ю. М., Фомичева Т. И., Доморадов А. Е. Анализ динамики РБМК-1000 при разрыве напорного коллектора на малой мощности // Атомная энергия.* - 1993. - 75. - Вып. 2. - С. 88-92
18. *Анализ аварии на Чернобыльской АЭС с учетом разрушения активной зоны / А. А. Афанасьева, А. М. Федосов, Р. Дондерер и др. - Атомная энергия.* - 1994. - 77. - Вып. 2. - С. 87-93.
19. *Общая характеристика аварии на ЧАЭС и ее последствий // Информация к национальному докладу на международных конференциях в связи с 10-летием Чернобыльской катастрофы.* - 1995. - 14 с.
20. *Тимошенко С. П. Сопротивление материалов. -Т. 1. - М.: Физматиздат, 1960. - 379 с.*
21. *Техническое описание установок, систем и оборудования I очереди Чернобыльской АЭС // Министерство атомной энергетики СССР. ПО «Комбинат». ЧАЭС им. В. И. Ленина. Чернобыль, 1988. - 141 с.*

22. Доллежалъ Н. А., Емельянов И. Я. Канальный ядерный энергетический реактор. - М.: Атомиздат, 1980. - 208 с.

23. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 526 с.

24. Физические величины. Справочник. / Под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. - М.: Энергоатомиздат, 1991. - 900 с.

43

25. Сергеева Л. В., Тутнов А. А. Расчетное исследование термомеханического взаимодействия труб технологических каналов и элементов графитовой кладки канального реактора // Атомная энергия. - 1990. - 68. - Вып. 4. - С. 236-241.

26. Карасев В. С., Чирко Л. И., Тутнов А. А. и др. Модульная коррозия циркониевых труб канальных реакторов // Атомная энергия. - 1992. - 72. - Вып. 2. - С. 124-130.

Получено 11.04.96.