

СТАТЬИ

УДК 621.039.53:621.039.526

УТОЧНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ И ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВВОДА ЭНЕРГООБЛОКА С БН-800 В ЭКСПЛУАТАЦИЮ

Фадеев И.Д., Дмитриева И.В., Пахолков В.В., Рогожкин С.А., Шепелев С.Ф.

(АО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород)

e-mail: fadeev_id@okbm.nnov.ru

Энергоблок № 4 Белоярской АЭС с БН-800 был сдан в промышленную эксплуатацию 31 октября 2016 г. Этому предшествовал большой комплекс работ. Были проведены испытания для подтверждения проектных режимных параметров реакторной установки и теплогидравлических характеристик основного оборудования — промежуточного теплообменника, парогенератора, главных циркуляционных насосов первого и второго контуров.

Эксплуатационными режимами, в которых реакторная установка должна надежно работать большую часть времени, являются режимы нормальной эксплуатации. К ним относятся плановый режим выхода на номинальную мощность при пуске, стационарный с номинальными параметрами, плановый останов и работа на пониженной мощности, связанная с выходом из строя отдельных узлов и оборудования или отключением петель теплоотвода. Наиболее представительными режимами нормальной эксплуатации являются пуск и плановый останов, в которых мощность реактора варьируется от 0 до 100% при соответствующем изменении теплогидравлических параметров.

В настоящей работе обобщены фактические по результатам ввода энергоблока в эксплуатацию данные о режимных параметрах (температуре, расходе, мощности) БН-800 и теплогидравлические характеристики промежуточного теплообменника (ПТО) и главных циркуляционных насосов первого (ГЦН-1) и второго контура (ГЦН-2) с учетом расчета по аттестован-

ным программам ТР-БН (Россия), RATO (Россия) и PSFF (Северная Ирландия).

Описание программ. Для расчетного анализа теплогидравлических характеристик ПТО, ГЦН-1, -2 и параметров БН-800 в режимах нормальной эксплуатации используется комплекс аттестованных программ. По программе RATO рассчитываются параметры натриевого теплоносителя в кожухотрубных противоточных теплообменных аппаратах натрий—натрий при заданной геометрии и установившихся параметрах теплоносителя на входе. Расход и температура в межтрубном пространстве теплообменника определяются из численного решения системы усредненных дифференциальных уравнений в цилиндрическом анизотропном пористом теле, состоящем из пучков стержней [1]. Программа позволяет получить двумерное распределение температуры и скорости теплоносителя в трубном пучке теплообменника. По этой программе рассчитаны теплогидравлические характеристики ПТО БН-800.

Программа PSFF предназначена для расчета теплогидравлических параметров в гидравлической сети произвольной конфигурации в стационарных режимах при принудительной циркуляции теплоносителя. Программа позволяет определять давление и расход теплоносителя посредством решения системы нелинейных уравнений гидравлики в одномерной постановке [2]. Гидравлическое сопротивление рассчитывается с использованием эмпирических соотношений. По этой программе определяли гидравлические характеристики ГЦН-1, -2 БН-800.

Программа ТР-БН предназначена для расчета статических параметров — температуры и расхода в теплопередающих контурах в реакторной установке с трехконтурной схемой теплопередачи от реактора к турбогенератору на различном уровне мощности. Она позволяет оперативно выполнять многовариантные оптимизационные и прогнозные статические расчеты режимов нормальной эксплуатации [3]. Распределение температуры по контурам описывается системой уравнений теплового баланса и теплопередачи, которая решается итерационным методом [4]. Эту программу использовали для определения теплогидравлических параметров БН-800 в режимах нормальной эксплуатации.

Эксплуатационная база данных. При вводе БН-800 в эксплуатацию выполнялся комплекс исследований и испытаний для определения теплогидравлических характеристик оборудования и режимных параметров реакторной установки в целом. По результатам исследований получены фактические стационарные параметры реакторной установки по контурам для всех петель на различной мощности, рассчитана и определена фактическая тепловая мощность по контурам. Эти данные использовали для анализа теплогидравлических характеристик ПТО и параметров реакторной установки в режимах нормальной эксплуатации.

При пусконаладочных работах в рамках программ испытаний получены фактические гидравлические характеристики первого и второго контуров для различных частот вращения ГЦН-1 и ГЦН-2.

Для комплексной отработки алгоритмов и получения фактических теплогидравлических параметров на этапах энергетического пуска и опытно-промышленной эксплуатации БН-800 проведены испытания пуска и планового останова на трех и двух петлях.

Анализ теплогидравлических характеристик ПТО. Фактические характеристики ПТО оценивали по данным, полученным при испытаниях БН-800 в стационарных режимах на мощности 60—100%. В работе находились три или две петли с 8—10 секциями парогенератора.

Фактический коэффициент теплопередачи определяли по одномерной методике в предположении продольного течения натрия вдоль всей теплообменной поверхности по уравнению

$$N = k_{\phi} F \Delta t_{\ln}, \quad (1)$$

где N — тепловая мощность, передаваемая в одном ПТО от натрия первого контура к натрию второго контура, Вт; k_{ϕ} — фактический коэффициент теплопередачи, реализующийся при эксплуатации ПТО, Вт/(м²·°C); F — поверхность теплообмена ПТО, м²; $\Delta t_{\ln}$ — логарифмический температурный напор работающего по схеме противотока теплообменника, вычисленный по измеренной температуре, °C.

Поскольку для некоторых параметров (расход, температура) не предусмотрена установка индивидуальных датчиков на каждом ПТО, коэффициенты теплопередачи оценивали по усредненным параметрам петли для двух ПТО.

Для гарантированной передачи требуемой мощности от активной зоны через ПТО на этапе проектирования необходимо учитывать отклонения основных исходных данных от номинальных, влияющие на его тепловую эффективность, такие, как погрешность формул для расчета теплопередачи, погрешность теплофизических свойств, допуск на изготовление труб, отклонение режимных параметров, глушение труб и др. Для компенсации этих отклонений в конструкции вводится запас поверхности теплообмена.

При обработке данных принимается, что отличие фактической эффективности ПТО от проектной обусловлено, главным образом, расхождением проектного и фактического коэффициента теплопередачи. Таким образом, коэффициент использованного запаса поверхности теплообмена ПТО определяется по соотношению

$$K_{з,\phi} = k_{р,\phi}/k_{\phi}, \quad (2)$$

где $k_{р,\phi}$ — расчетный коэффициент теплопередачи, вычисленный по фактическим параметрам, Вт/(м²·°C).

Проектный коэффициент запаса поверхности теплообмена ПТО определяется по соотношению

$$K_{з,п} = k_{р,п}/k_{п},$$

где $k_{р,п}$ — расчетный коэффициент теплопередачи, вычисленный по проектным параметрам, Вт/(м²·°C); $k_{п}$ — проектный коэффициент теплопередачи с учетом запаса поверхности теплообмена, Вт/(м²·°C).

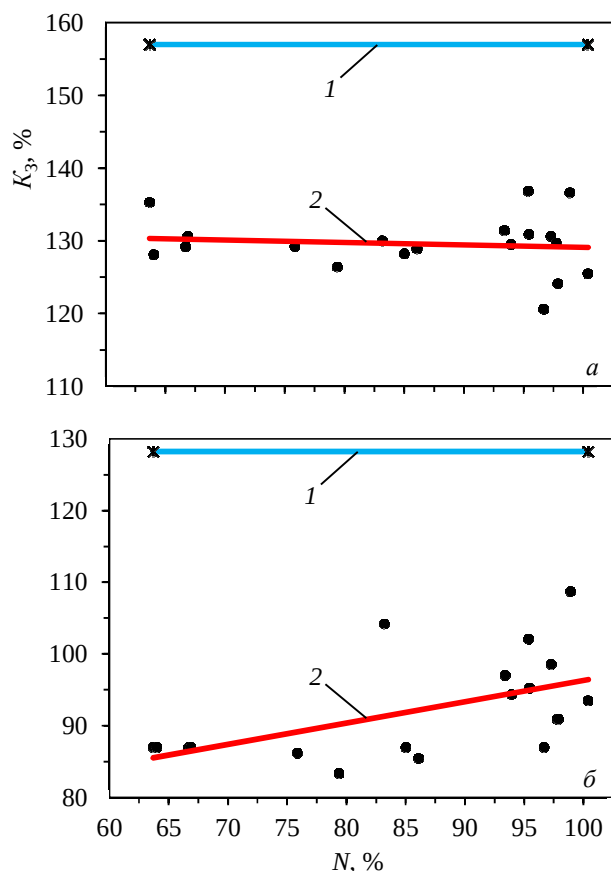
Запас (использованный или проектный) поверхности теплообмена ПТО определяется по соотношению

$$\eta = (K_3 - 1)100\%, \quad (3)$$

где K_3 принимает значение $K_{3,ф}$ или $K_{3,п}$.

На рис. 1, а коэффициент запаса (использованный или проектный) приведен с учетом расчетов по одномерной программе ТР-БН. По результатам обработки опытных данных по формулам (1)–(3) получено, что использованный запас поверхности теплообмена ПТО на уровне мощности 75–100% лежит в диапазоне 20–37% и в среднем составляет 29%. Погрешность его определения учитывала погрешности измерения температуры, расхода натрия, частоты вращения насосов, расчета тепловой мощности реактора и составила 15%. Проектный запас составляет 57%.

Сложность теплогидравлического расчета ПТО связана с наличием продольно-поперечного течения теплоносителя первого контура в районе входных/выходных окон, что приводит к неравномерному распределению расхода теплоносителя в межтрубном пространстве и, как следствие, неравномерности распределения температуры и теплосъема по высоте и радиусу



Р и с. 1. Зависимость проектного (1) и использованного коэффициента запаса (2) поверхности теплообмена ПТО БН-800 от мощности петли N в одно- (а) и двумерном приближении (б)

трубного пучка. При таком течении теплоносителя для обоснования эффективности ПТО необходим теплогидравлический расчет в двумерном приближении, для чего использовалась программа RATO. Масштаб и характер неравномерности теплоносителя в межтрубном пространстве зависят от соотношения инерционных сил и сил объемного сопротивления при обтекании трубного пучка продольным и поперечным потоком.

Двумерный теплогидравлический расчет ПТО наряду с получением пространственного распределения температуры и скорости позволяет частично исключить излишний запас поверхности теплообмена, учитывающий продольно-поперечное обтекание на большей части трубного пучка, и оценить необходимый проектный запас.

На рис. 1, б коэффициент запаса (использованный или проектный) приведен с учетом расчетов по двумерной программе RATO. Использованный запас поверхности теплообмена ПТО не превышает 9%. Заложенный проектный запас составляет 28%. Как видно на рис. 1, при расчете в двумерном приближении уменьшается эффективность теплопередачи в ПТО примерно на 20–30%, что может быть связано с учетом продольно-поперечного течения теплоносителя первого контура в районе входных/выходных окон. Разброс коэффициента использованного запаса поверхности теплообмена ПТО (см. ● на рис. 1) обусловлен погрешностью определения фактического и расчетного коэффициента теплопередачи.

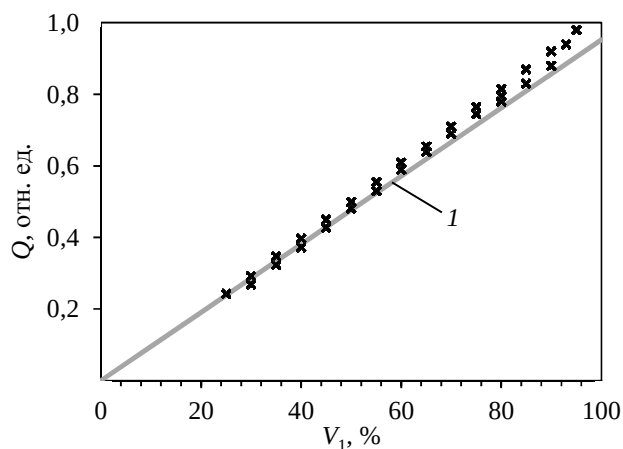
На основании анализа и с учетом неопределенностей исходных данных — погрешности измерительных приборов, глушения части труб, отклонений режимных параметров и др. при проектировании ПТО аналогичной конструкции с применением двумерных кодов проектный запас поверхности теплообмена может приниматься на уровне 20–30%.

Анализ гидравлических характеристик насосов. Для определения рабочей частоты вращения ГЦН-1, -2 проанализированы фактические гидравлические характеристики первого и второго контуров БН-800, полученные при испытаниях.

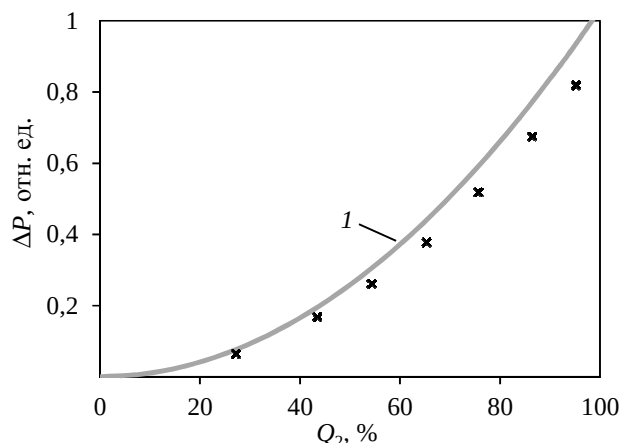
Для гарантированного номинального расхода натрия в контурах необходим запас по напору ГЦН-1, -2, который определяется с учетом до-

пусков при изготовлении оборудования, трубопроводов и отклонений гидравлических характеристик при проектировании. Запас ГЦН-1, -2 БН-800 назначен с учетом опыта проектирования и ввода в эксплуатацию БН-600. Уменьшение консерватизма при назначении запаса позволяет улучшить при прочих равных условиях массогабаритные характеристики насосов. Таким образом, результаты анализа достаточности запаса напора ГЦН-1, -2 по результатам испытаний БН-800 могут быть использованы при проектировании насосов перспективных быстрых натриевых реакторов.

По экспериментальным гидравлическим характеристикам элементов первого контура (активная зона, ГЦН-1, дроссели) при расчете с помощью программы PSFF определены гидравлические характеристики БН-800. Результаты расчета верифицированы по показаниям байпасного расходомера ГЦН-1, полученным при испытаниях насосов на различных частотах вращения. Как видно на рис. 2, экспериментальный и расчетный расход натрия первого контура через байпасный расходомер имеет хорошее совпадение, отличие составляет не более 8%. Из расчета с использованием экспериментальных данных определена рабочая частота вращения ГЦН-1 при работе трех и двух насосов. Частота вращения ГЦН-1 для обеспечения номинального расхода натрия в первом контуре при работе как двух, так и трех насосов ниже, чем по проекту, на 5%. При этом требуемые обороты обеспечиваются регулированием с помощью преобразователя частоты. Результаты сравнительного анализа показывают достаточность заложенного в проекте запаса по напору ГЦН-1.



Р и с. 2. Зависимость расхода натрия через байпасный расходомер Q от частоты вращения ГЦН-1 V_1 : 1, $\times$ — расчет и испытание соответственно



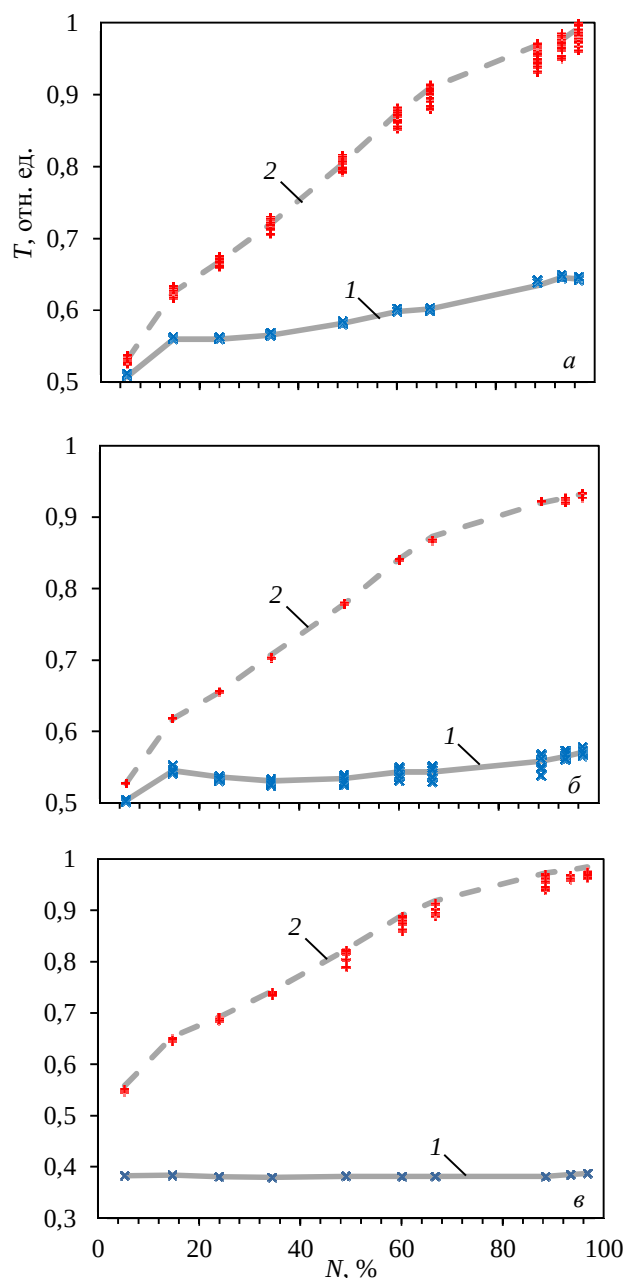
Р и с. 3. Гидравлическая характеристика второго контура: 1 — расчет; $\times$ — испытание (ΔP — потери давления, Q_2 — расход второго контура)

На рис. 3 приведены рассчитанная по программе PSFF и измеренная гидравлическая характеристика петли второго контура. Измеренные потери давления во втором контуре ниже рассчитанных по программе, отличие составляет не более 14%. Частота вращения ГЦН-2 для обеспечения номинального расхода натрия во втором контуре ниже, чем по проекту, на 8%. Требуемые обороты ГЦН-2 обеспечиваются регулированием с помощью преобразователя частоты. Сравнительный анализ показывает достаточность заложенного в проекте запаса по напору ГЦН-2.

Из приведенных результатов следует, что принятые в проекте запасы по напору ГЦН-1, -2 позволяют обеспечить номинальный расход натрия первого и второго контуров в диапазоне регулирования частоты вращения 5—10%.

Анализ теплогидравлических параметров реакторной установки. Анализ теплогидравлических параметров БН-800 в режимах нормальной эксплуатации выполнен с учетом измерения параметров трех контуров в стационарном состоянии на мощностях 5, 15, 25, 35, 50, 60, 67, 85, 100% $N_{\text{ном}}$. Фактическая тепловая мощность реактора определялась по средне-взвешенным значениям по всем трем контурам. В расчетах по программе ТР-БН использовались результаты анализа теплогидравлических характеристик ПТО и ГЦН-1, -2, полученные в рамках настоящей работы.

Результаты сравнительного анализа, приведенные на рис. 4, показывают удовлетворительное совпадение расчетных и эксплуатационных



Р и с. 4. Расчетная и соответственно эксплуатационная зависимость температуры натрия первого контура БН-800 на входе в напорную камеру (1, $\times$) и ПТО (2, $+$) (а), второго контура на выходе (1, $\times$) и входе в парогенератор (2, $+$) (б), питательной воды на входе (1, $\times$, исходные данные для расчета) и выходе воды/пара из парогенератора (2, $+$) (в) от мощности петли

параметров. Отклонения составляют для температуры натрия по первому контуру не более 9°C , по второму не более 3°C , по воде/пару на выходе из парогенератора не более 8°C и лежат в области погрешностей, указанных в аттестационном паспорте программы ТР-БН.

Анализ испытаний в части изменения режимных параметров показал удовлетворительное совпадение с режимами пуска и останова,

заложенными в проекте. В частности, перевод в паровой режим, подключение пароперегревательных модулей парогенератора, изменение частоты вращения ГЦН-1, -2, временные выдержки на различной мощности, связанные с ограничениями со стороны реактора и турбины, в целом осуществлялись в соответствии с требованиями проекта. Отличия прохождения режимов пуска и планового останова были связаны с уменьшением фактической скорости изменения параметров с целью снизить температурное воздействие на оборудование и твэлы. Увеличение длительности протекания режимов в процессе испытания обусловлено также наличием дополнительных временных выдержек на различных уровнях мощности для проверки состояния оборудования, стабилизации и фиксации параметров.

Использование программы ТР-БН позволяет рассчитывать теплогидравлические параметры на различных уровнях мощности с приемлемой точностью. Подтверждена правильность заложенных в проекте алгоритмов для режимов пуска и планового останова.

Закключение. Анализ расчетных и экспериментальных теплогидравлических характеристик ПТО БН-800 показал достаточность принятого в проекте запаса по теплообменной поверхности. При этом для проектирования аналогичного ПТО БН-800 теплообменника с применением двумерных программ запас теплообменной поверхности может приниматься на уровне 20–30%, одномерных — на уровне 40–50%.

Показано, что фактическая частота вращения ГЦН-1, -2 для номинального расхода натрия в первом и втором контуре БН-800 ниже, чем по проекту, на 5 и 8% соответственно. Таким образом, подтверждена достаточность принятого в проекте запаса по напору насосов.

Сравнительный анализ расчетных и эксплуатационных параметров в режимах пуска и останова показал, что программа ТР-БН с приемлемой точностью определяет теплогидравлические параметры БН-800 и может быть использована для расчета режимов нормальной эксплуатации перспективных реакторных установок с быстрыми натриевыми реакторами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Методические** указания. Тепловой и гидравлический расчет теплообменного оборудования АЭС. РД 24.035.05—89. Л., НПО ЦКТИ, 1991.
2. **Complete** Pipe Flow Simulation Software [Электронный ресурс]. URL: <https://fluidflowinfo.com> (дата обращения 14.09.2021).
3. **Фадеев И.Д., Дмитриева И.В., Осипов С.Л., Рогожкин С.А.** Разработка и верификация программы ТР-БН для обоснования режимов нормальной эксплуатации реакторов БН. — Изв. вузов. Ядерная энергетика, 2016, вып. 1, с. 30—40.
4. **Михеев М.А., Михеева И.М.** Основы теплопередачи. Изд. 2-е. М.: Энергия, 1977.

Поступила в Редакцию 2.03.21

УДК 621.039.58

ОЦЕНКА КОРРОЗИИ КОРПУСА УСТРОЙСТВА ЛОКАЛИЗАЦИИ РАСПЛАВА ЗА ПЕРИОД ЭКСПЛУАТАЦИИ АЭС

*Фиськов А.А., Шкрыгунова Е.В., Магола И.А. (АО «Атомэнергoproject», г. Санкт-Петербург),
Дитц А.А., Верецагин В.И. (Томский политехнический ун-т, г. Томск)
e-mail: aafiskov@atomproekt.com*

В соответствии с проектом АЭС устройство локализации расплава располагается в шахте подреакторного пространства. Из-за высокой дозовой нагрузки она не вентилируется и не обслуживается, доступ в помещение возможен только во время планово-предупредительного ремонта. При эксплуатации АЭС оно не функционирует, находится в режиме ожидания, в состоянии холодного резерва шахта устройства сухая. Однако во время протекания проектной аварии в режиме большой течи теплоносителя система локализации расплава переходит в состояние горячего резерва — шахта заполняется водой и система готова к приему расплава.

Внешний корпус устройства локализации расплава согласно ГОСТу 1577—93 выполняется из стали марки Ст20 и по условиям сохранения необходимых параметров теплообмена не покрывается от коррозии защитными материалами. При эксплуатации АЭС в шахту возможно попадание сред в результате неконтролируемого пролива, локализации проектных аварий и др. В шахте формируется среда, которая может способствовать образованию как питтинговой, так и сквозной коррозии металла корпуса устройства локализации расплава [1]. Температура в подреакторном пространстве при нормальных условиях эксплуатации может достигать 60 °С. Таким образом, в период эксплуатации станции корпус устройства будет подвержен постоянной коррозионной нагрузке.

Целью работы является определение количественных характеристик коррозии и состоя-

ния целостности корпуса устройства локализации расплава при эксплуатации АЭС в целях корректировки теплофизических характеристик, используемых для обоснования безопасности при тяжелых авариях. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

выполнить искусственное старение образцов в условиях, имитирующих среду шахты реактора;

определить зависимость коррозии от времени и ожидаемые коррозионные потери.

Старение металла изучали расчетно-экспериментальным методом ускоренного определения коррозионных потерь в зависимости от агрессивности атмосферы согласно ГОСТу 9.040—74. Метод заключается в определении коррозионных потерь на основании результатов ускоренных испытаний металла и параметров, характеризующих коррозионную агрессивность атмосферы согласно ГОСТу 9.039—74.

При аварии реактора с потерей теплоносителя из системы охлаждения проливаются бор- и гидразингидратсодержащие растворы. Растворы могут содержать также ионы калия. Динамические параметры среды — температура, давление, масса и концентрация ионов гидразингидрата, калия и борной кислоты определены дополнительными расчетами протекания проектных и запроектных аварий при подготовке отчета по обоснованию безопасности АЭС. Влажность 90% в течение срока эксплуатации принята консервативно как наихудшее условие, поскольку