

Ю. Ю. Воробьев, И. А. Терещенко
Государственное предприятие «Государственный
научно-технический центр по ядерной и радиационной
безопасности», г. Киев, Украина

Расчетное исследование численных критериев эффективности теплообменников системы аварийного охлаждения активной зоны реактора в различных условиях работы при помощи кода RELAP5

Выполнено моделирование теплообменника CAO3 для компьютерного кода RELAP5/MOD3.2, на основании которого исследовалась эффективность его работы в проектных и аварийных режимах в зависимости от степени загрязнения теплообменных труб. Рассмотрен спектр возможных значений коэффициентов термического сопротивления, проведена оценка различных вариантов глушения теплообменных труб. На основании полученных результатов оценены величины изменения эффективности теплообменника и его коэффициента теплоотдачи, а также предельные параметры, при которых критерии по температуре воды на выходе из теплообменника не превышают 90 °С.

Ключевые слова: теплообменник, теплообменная трубка, глушение, расчетная модель, расчетный код, коэффициент теплоотдачи, эффективность.

Ю. Ю. Воробйов, І. А. Терещенко

Розрахункове дослідження числових критеріїв ефективності теплообмінників системи аварійного охолодження активної зони за різних умов роботи з допомогою коду RELAP5

Виконано моделювання теплообмінника CAO3 для комп'ютерного коду RELAP5/MOD3.2, на основі якого досліджено ефективність його роботи в проектних та аварійних режимах залежно від ступеню забруднення теплообмінних трубок. Розглянуто спектр можливих значень коефіцієнтів термічного опору, проведено оцінку різноманітних варіантів глушення теплообмінних трубок. На підставі отриманих результатів оцінено величини змінення ефективності теплообмінника, коефіцієнта тепловіддачі та граничних параметрів, за яких критерії по температурі води на виході з теплообмінника не перевищують 90 °С.

Ключові слова: теплообмінник, теплообмінна трубка, глушення, розрахункова модель, розрахунковий код, коефіцієнт тепловіддачі, ефективність.

© Ю. Ю. Воробьев, И. А. Терещенко, 2014

Система аварийного охлаждения активной зоны реактора (CAO3), совмещающая функции устройства нормальной эксплуатации и защитного устройства, должна обеспечивать отвод тепла от активной зоны в аварийных режимах и в режимах планового и ремонтного расхолаживания. Поэтому для выполнения данных функций необходимо обеспечить достаточную эффективность работы теплообменников (ТО) CAO3. Один из факторов снижения эффективности работы теплообменников — работа в период расхолаживания реакторной установки (РУ) с 70...80 °С до 35...40 °С (образование карбонатных отложений на теплообменных трубках из-за высокого содержания солей в технической воде группы «А»).

Цель работы — исследование влияния деградации теплообменников на эффективность CAO3 при работе в аварийных и плановых режимах, а также влияния глушения различного количества теплообменных трубок.

Для разных вариантов загрязнения теплопередающей поверхности и глушения трубок парогенератора (ПГ) определены численные значения температурных характеристик теплоносителя, коэффициентов теплообмена, мощности ТО CAO3, которые могут быть приняты в качестве предельных.

Проведено моделирование охлаждения по схеме планового (ремонтного) и аварийного расхолаживаний, оценены возможные критерии деградации теплопередающей способности ТО CAO3.

Модель. Расчетная модель ТО CAO3 разработана для теплогидравлического кода RELAP5/MOD3.2 [2]. Выполнено моделирование тракта межтрубного пространства (вода первого контура) по обе стороны разделительной перегородки при помощи компонент 133 и 135 типа «pipe». Для более подробного представления теплообмена по длине, каждый из объемов разделен на 50 участков. Для упрощения модели двухъярусное течение теплоносителя представлено одномерным в горизонтальной плоскости. Входные условия по среде первого контура задаются при помощи времязависимого объема 131 и связи 132. Внешний вид ТО CAO3 [1] представлен на рис. 1.

При моделировании пути протекания технической воды отдельно выделены объемы на входе и выходе технической воды (объемы 142, 148), а также объем при развороте потока в районе днища ТО CAO3 (объем 145). Объем трубки ТО разделен на два канала по обе стороны течения, которые составляют 45 % и 5 % теплообменных трубок и представлены компонентами 143, 144 и 146, 147 соответственно. Такое разбиение имитирует движение технической воды внутри трубок по обе стороны разделительной перегородки и позволяет моделировать одновременную работу ТО CAO3 при разделении потока на большой канал (90 % трубок) и малый канал (10 % трубок). Входные параметры по среде технической воды задаются при помощи времязависимого объема 140 и связи 141. Нодализационная схема модели ТО CAO3 представлена на рис. 2.

Тепловые структуры соединяют тракты первого контура и технической воды через поверхность теплообмена таким образом, что получается противоточная схема течения сред. Каждая структура имеет 50 аксиальных элементов. По толщине трубок она представляет собой 5 слоев для материала трубки (нержавеющая сталь) и 3 слоя по толщине отложений. Толщина слоя отложений принята равной 0,2 мм. Теплоемкость отложений принята равной теплоемкости мела. Теплопроводность отложений может регулироваться для получения требуемого термического сопротивления (например, для получения

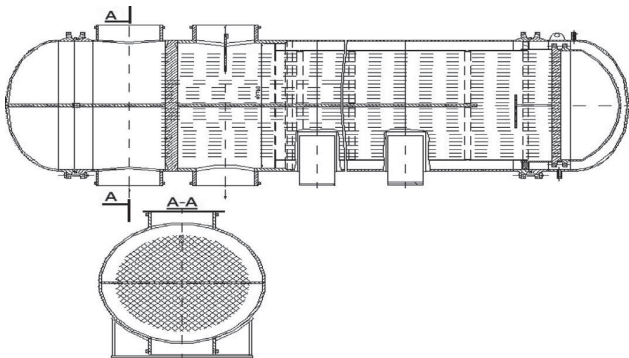


Рис. 1. Теплообменник аварийного и планового расхолаживания

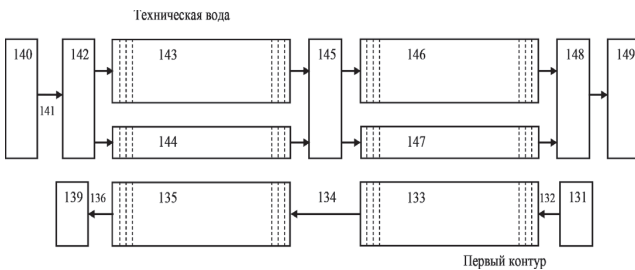


Рис. 2. Нодализация модели ТО CAOZ

термического сопротивления $10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ теплопроводность составила $20 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Корреляция теплообмена по обе стороны трубочки выбрана по умолчанию для трубок. В данном случае в качестве консервативного допущения принимались ухудшение теплообмена и более высокие температуры на выходе ТО (следовательно, меньшие теплопередающие мощности). При росте термического сопротивления отложений по внутренней поверхности труб влияние корреляции теплообмена на внешней поверхности трубочки снижается.

Кроме того, проведено моделирование элементов раздельной трубной доски. Исходя из разности энтальпий на входе и выходе, а также из расхода среды, дополнительно рассчитывалась мощность теплообмена по обеим средам. Общий коэффициент теплообмена ТО определяется через мощность ТО и среднелогарифмический температурный напор и приводится к номинальной площади теплообмена, которая составляет 935 м^2 .

Логарифмический температурный напор определяется по формулам [3]

$$\Delta T_0 = T_{\text{вх}1} - T_{\text{вых}2}, \quad (1)$$

$$\Delta T_M = T_{\text{вых}1} - T_{\text{вх}2}, \quad (2)$$

$$\Delta T = \frac{\Delta T_0 - \Delta T_M}{\ln\left(\frac{\Delta T_0}{\Delta T_M}\right)}, \quad (3)$$

где ΔT_0 , ΔT_M — большой и меньший перепады температур; $T_{\text{вх}1}$, $T_{\text{вых}1}$ — температура на входе и выходе ТО по первому контуру; $T_{\text{вх}2}$, $T_{\text{вых}2}$ — температура на входе и выходе ТО по контуру технической воды.

Результирующий коэффициент теплообмена

$$K = \frac{Q}{F \cdot \Delta T}, \quad (4)$$

где Q — мощность ТО.

Отключение 10 % трубок теплообмена производится перекрытием малого канала в объеме протекания технической воды путем установки больших коэффициентов гидравлического сопротивления.

Начальные условия. В качестве начальных условий для модели выбираются конкретные значения давления и температур по объемам первого контура и технической воды модели. Так как расчет проводится на временном интервале 1 ч до полной стабилизации теплообмена, начальные температуры не имеют определяющего значения.

Проверка модели ТО. В качестве проверочного расчета проведен анализ режима аварийного расхолаживания. Данный анализ является максимально требовательным к характеристикам ТО CAOZ. В базовой модели принято чистое состояние ТО CAOZ с термическим сопротивлением отложений $10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Результаты анализа характеристик модели ТО CAOZ для максимального проектного режима таковы:

| | |
|---|-------|
| Давление теплоносителя по межтрубному пространству (первый контур), абс., кгс/см ² | 21,0 |
| Давление теплоносителя по трубному пространству (техническая вода), абс., кгс/см ² | 3,0 |
| Расход воды по межтрубному пространству, т/ч | 1750 |
| Расход воды по трубному пространству, т/ч | 3000 |
| Температура на входе в ТО (первый контур), °С | 150,0 |
| Температура на выходе ТО (первый контур), °С | 87,5 |
| Температура на входе в ТО (техническая вода), °С | 40,0 |
| Температура на выходе ТО (техническая вода), °С | 76,9 |
| Мощность ТО CAOZ, МВт | 128,8 |
| Коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·°С) | 2320 |

Граничные условия. Граничные условия анализа выбирались конкретно для задаваемых параметров расхода и температуры на входе в ТО CAOZ по охлаждаемой воде первого контура и по контуру технической воды. Также регулировалось термическое сопротивление отложений. Расчет выполнялся на временном интервале 3600 с: за это время происходит полное выравнивание характеристик модели, после чего производится их регистрация.

Анализ результатов расчета. Проведен анализ характеристик ТО CAOZ для различных вариантов значений термического сопротивления и количества отложений. Для термического сопротивления отложений чистого теплообменника $10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ [4, 5] (данное значение соответствует оксидным пленкам на чистых поверхностях труб) получены результаты, представленные в табл. 1.

Выполнены расчеты для случая увеличения термического сопротивления отложений. Результаты, полученные для значений термического сопротивления отложений теплообменника $10^{-4} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, $10^{-3} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, представлены на рис. 3–5. Группирование результатов проходило путем рассмотрения таких параметров, как температура теплоносителя на выходе из первого контура, снижение мощности ТО и снижение коэффициента теплообмена в зависимости от начального расхода и температуры теплоносителя на входе в первый контур.

Таблица 1. Параметры теплообмена в ТО САОЗ при термическом сопротивлении отложений $10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ (чистый теплообменник)

| Расход, т/ч | | Температура, °С | | | | Мощность ТО САОЗ, МВт | Коэффициент теплообмена, Вт/(м ² ·°С) |
|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------------|--|
| первого контура | технической воды | входа | | выхода | | | |
| | | первого контура | технической воды | первого контура | технической воды | | |
| 200 | 3000 | 70 | 40 | 44,4 | 41,7 | 5,94 | 495 |
| 400 | 3000 | 70 | 40 | 46,7 | 43,2 | 10,90 | 804 |
| 750 | 3000 | 70 | 40 | 49,3 | 45,2 | 18,0 | 1218 |
| 750 | 3000 | 150 | 40 | 68,2 | 60,7 | 72,1 | 1455 |
| 1750 | 3000 | 150 | 40 | 87,5 | 76,9 | 128,8 | 2320 |
| 1750 | 3000 | 120 | 40 | 75,0 | 66,0 | 90,7 | 2194 |
| 1750 | 3000 | 130 | 40 | 79,7 | 69,6 | 103,2 | 2238 |
| 1750 | 3000 | 140 | 40 | 83,6 | 73,3 | 116,0 | 2283 |

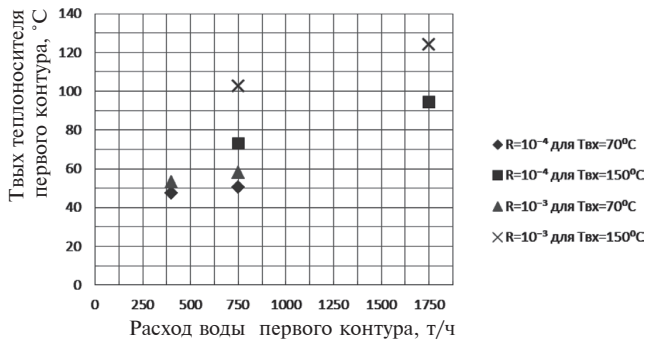


Рис. 3. Изменение температуры воды на выходе из ТО САОЗ

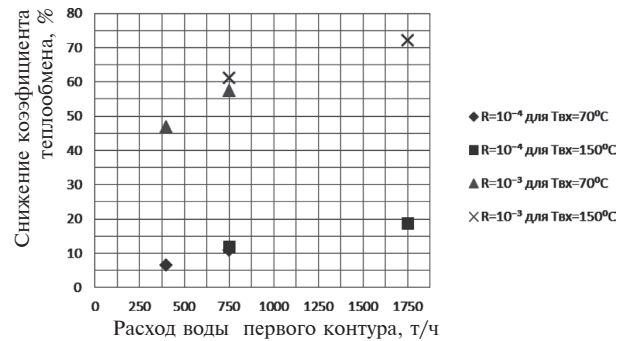


Рис. 5. Снижение значения коэффициента теплопередачи по сравнению с вариантом «чистого» ТО ($R = 10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$)

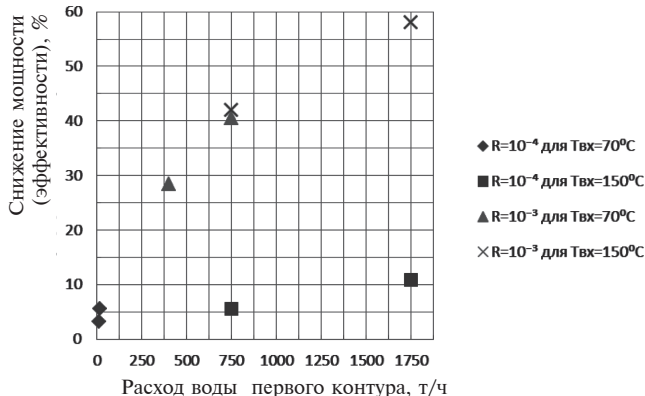


Рис. 4. Снижение мощности (эффективности) ТО САОЗ по сравнению с вариантом «чистого» ТО ($R = 10^{-5} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$)

При анализе результатов целесообразно выделить режимы, в которых нарушаются установленные пределы по температуре воды на выходе из первого контура (не более 90 °С). Как видно из рис. 5, для случая аварийного расхолаживания при $R = 10^{-4} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, расходе воды 1750 т/ч и температуре входа первого контура 150 °С максимальное снижение коэффициента теплопередачи, по сравнению с вариантом «чистого» теплообменника, составило 19 %, а

снижение мощности (эффективности) — 11 %. Отметим, что для данного режима температура на выходе ТО САОЗ превышает установленный предел 90 °С и равна 94,4 °С.

При аналогичных входных данных, для варианта $R = 10^{-3} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$ максимальное снижение коэффициента теплопередачи по сравнению с вариантом «чистого» теплообменника составило 72 % (рис. 5), а снижение мощности (эффективности) — 58 % (рис. 4). Температура на выходе ТО САОЗ превышает 90 °С и равна 124,0 °С. Полученные результаты показывают, что данное сопротивление представляет собой серьезную деградацию теплообмена.

Определены характеристики загрязнения ТО САОЗ, которые, при определенных температурах на входе в ТО по первому контуру, позволяют поддерживать температуру на выходе около 90 °С. Проводились расчетные анализы для различных входных условий в зависимости от значения температуры теплоносителя на входе в первый контур (120, 130 и 140 °С) и термического сопротивления, а именно: $3,33\cdot 10^{-4}$, $2,0\cdot 10^{-4}$ и $1\cdot 10^{-4} \text{ м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$. Во всех проведенных расчетах значение расхода воды принималось максимальным и составляло 1750 т/ч. Результаты расчетов представлены на рис. 6—8.

Таким образом, для получения в проектном режиме температуры на выходе ТО САОЗ менее 90 °С, при температурах на входе 120 °С, 130 °С и 140 °С, допустимо уменьшение коэффициента теплообмена не более чем на 44, 32

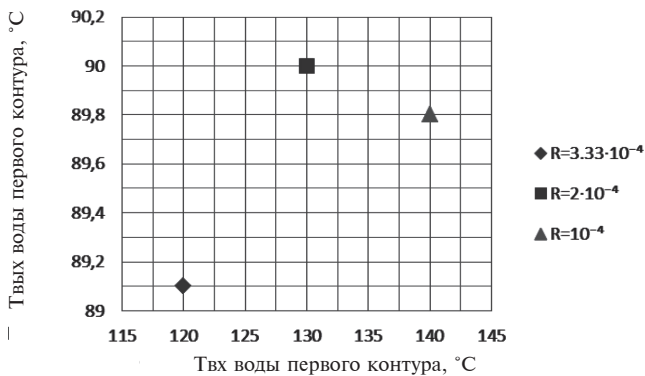


Рис. 6. Зависимость изменения температуры воды на выходе из ТО САОЗ от температуры на входе

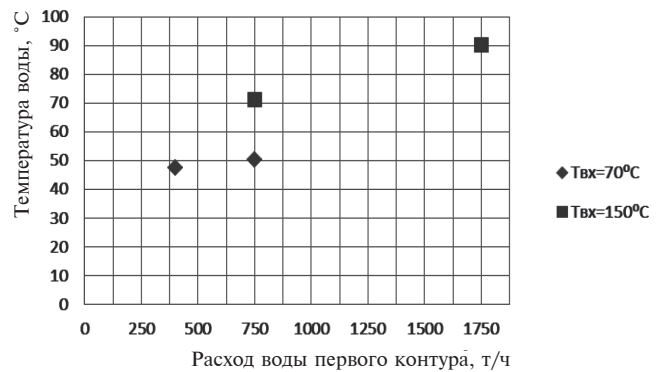


Рис. 9. Температура воды на выходе из ТО САОЗ

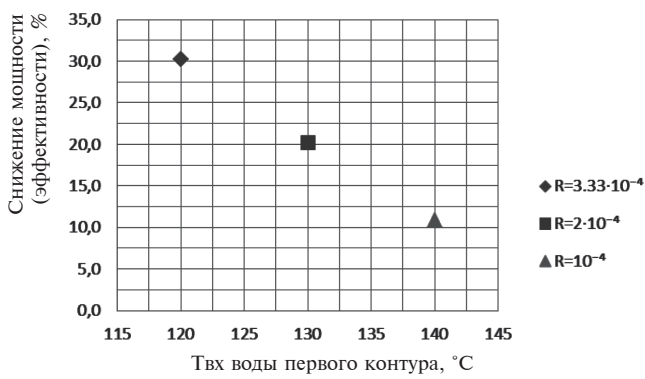


Рис. 7. Снижение мощности (эффективности) ТО САОЗ в зависимости от температуры на входе в ТО САОЗ

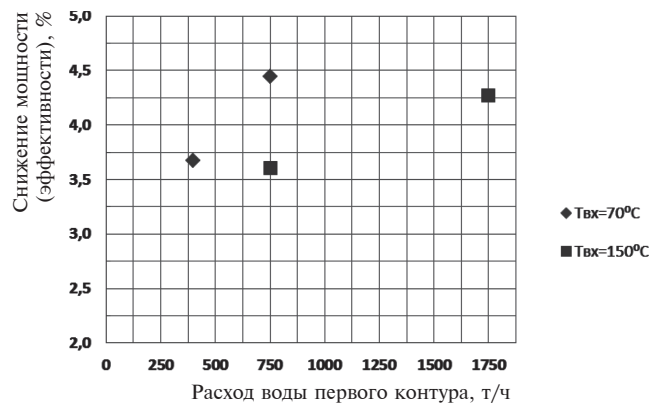


Рис. 10. Снижение мощности (эффективности) ТО САОЗ по сравнению с вариантом «чистого» ТО ($R = 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$)

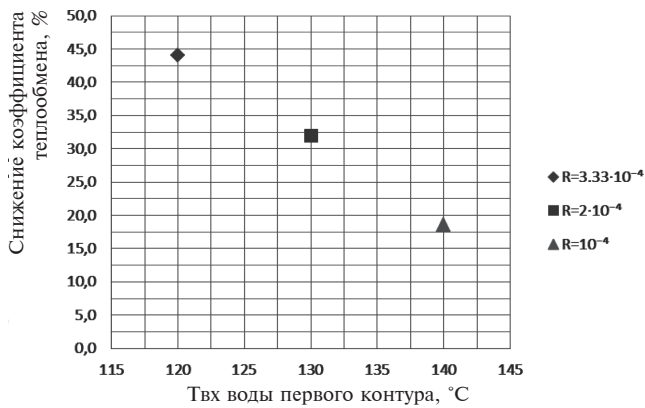


Рис. 8. Снижение коэффициента теплопередачи в зависимости от температуры воды на входе в ТО САОЗ

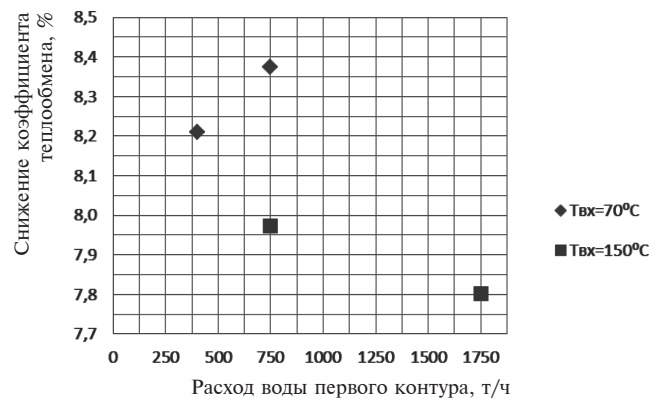


Рис. 11. Снижение значения коэффициента теплопередачи по сравнению с вариантом «чистого» ТО ($R = 10^{-5} \text{ м}^2 \cdot \text{К} / \text{Вт}$)

и 19 % по сравнению с «чистым» ТО. При этом эффективности уменьшаются на 30, 20 и 11 % соответственно.

Анализ глушения теплообменных трубок. Проводился анализ глушения 10 % теплообменных трубок ТО САОЗ, который в модели был выполнен установкой больших коэффициентов гидравлического сопротивления на входе в «малый» канал теплообмена. При этом происходит торможение потока воды по данным трубкам и они исключаются из теплообмена. Полученные результаты представлены на рис. 9—11.

При глушении 10 % трубок, по сравнению с вариантом «чистого» теплообменника, максимальное снижение коэффициента теплопередачи и снижение мощности (эффективности) составило 8,4 и 4,4 % соответственно. Данные значения параметров получены для случая планового расхолаживания с расходом воды 750 т/ч и температурой воды на входе в первый контур 70 °С. Отметим, что для режима с температурой воды на входе 150 °С и расходом 1750 т/ч температура на выходе ТО САОЗ практически точно равна 90 °С и, таким образом, данная величина глушения

позволяет при «чистом» теплообменнике удовлетворить проектные критерии даже при температуре входа 150 °С.

Аналогичная операция глушения 10 % трубок для ТО САОЗ с ухудшенным теплообменом и термическом сопротивлении отложений 10^{-4} м²·К/Вт дает снижение коэффициента теплопередачи на 9,6 %, а снижение мощности (эффективности) составляет 5,0 %, т. е. относительные результаты коррелируют с вариантом «чистого» теплообменника.

Выводы

На сегодняшний день обеспечение предельно допустимой эффективности теплообменника САОЗ является важной задачей для всех режимов эксплуатации АЭС. Система, являясь защитной системой безопасности, должна обеспечивать максимальное охлаждение теплоносителя первого контура.

Проведенные расчеты показали, что с увеличением отложений в трубках ТО САОЗ эффективность работы ТО снижается, что приводит к более раннему превышению установленного предела температуры теплоносителя на выходе из ТО САОЗ, равного 90 °С (при температуре на входе 150 °С), при меньших расходах. Аналогичная ситуация возникает и при увеличении количества заглушенных трубок. Полученные результаты указывают на необходимость проведения периодического контроля и проверок состояния трубок ТО САОЗ. Во избежание (отсрочки) накопления шлама в трубах целесообразно рассмотреть вариант использования дополнительных степеней очистки, установки фильтров и т. п.

Список использованной литературы

1. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка методики расчета теплогидравлических характеристик ТОАР» № 06/08–10.110.ОД.1БД : Отчет о НИР / ГНТЦ ЯРБ. — К., 2010.
2. Разработка многоцелевой теплогидравлической четырехпетлевой модели ЯППУ АЭС с ВВЭР-1000/320. Детализация основных компонентов модели (этап заключительный) : Отчет о НИР / ГНТЦ ЯРБ. — К., 2010.
3. Михеев М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева — М. : Энергия, 1977. — 344 с.

4. Кириллов П. Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / П. Л. Кириллов, Ю. С. Юрьев, В. П. Бобков. — М. : Энергоатомиздат, 1990. — 359 с.

5. Петухов Б. С. Справочник по теплообменникам / Б. С. Петухов. — Т. 2. — М. : Энергоатомиздат, 1987. — 352 с.

References

1. Report on the research work «Development of methodology for thermal and hydraulic characteristics calculating of HEEC» № 06/08–10.110.ОД.1БД : Report about SRW / SSTC NRS. — Kiev, 2010. (Rus)
2. Development of multipurpose thermohydraulic four-looped model of NPP with WWER-1000/320. Detailing the model main components (final stage) : Report about SRW / SSTC NRS. — Kiev, 2010. (Rus)
3. Mikheev M. A., Mikheeva I. M. Basics of heat transfer. — Moscow : Energy, 1977. — 344 p. (Rus)
4. Kirillov P. L., Yuriev Y. S., Bobkov V. P. Handbook on thermohydraulic calculations (nuclear reactors, heat exchangers, steam generators). — Moscow : Energoatomizdat, 1990. — 359 p. (Rus)
5. Petukhov B. S. Handbook on heat exchangers. — Book 2. — Moscow : Energoatomizdat, 1987. — 352 p. (Rus)

Получено 17.02.2014.