

УДК 621.039.534...24

А.Н. Соколов², В.И. Полуничев², В.В. Андреев¹, А.А. Баринов¹, С.А. Михай¹**МЕТОД ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННЫХ СИСТЕМ
АВАРИЙНОГО РАСХОЛАЖИВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова²

Статья посвящена разработке методики экспресс-оценки инновационных систем аварийного расхолаживания реакторных установок (РУ) с водо-водяными реакторами. В статье предложена оригинальная схема комбинированного теплоотвода остаточных тепловыделений к запасу воды через теплообменник конденсатор-испаритель (ТКИ) и атмосферному воздуху, через воздушный теплообменник-конденсатор (ВТК). Представлены основные положения методики оценки мощностных характеристик ВТК и ТКИ. Выполнена кроссверификация методики экспресс-оценки с теплогидравлическим расчетом САР одного из проектов РУ и показано хорошее количественное и качественное соответствие. Определены пути дальнейшего совершенствования методики с целью оптимизации конструкций и снижения консерватизма расчетов

Ключевые слова: система аварийного расхолаживания, теплообменник аварийного расхолаживания, парогенератор, обесточивание, цистерна аварийного расхолаживания, водо-водяной реактор.

Повышение уровня безопасности является одной из приоритетных задач при создании ядерных энергетических установок. Важным для безопасности фактором является надежный аварийный отвод остаточных тепловыделений от активной зоны в условиях невозможности использования систем нормальной эксплуатации и аварийных систем активного принципа действия (например, при полном длительном обесточивании установки). Основным направлением решения данной задачи в мировой практике является использование систем пассивного теплоотвода, не требующих внешних источников энергии. В настоящее время для реакторных установок (РУ) водо-водяного типа разработано множество вариантов систем пассивного отвода остаточных тепловыделений [1].

Наибольшее распространение получили два варианта пассивных систем, отличающихся способом передачи тепла к конечному поглотителю:

- с отводом тепла от а.з. через ПГ с испарением запаса воды в аварийной цистерне [2];
- с отводом тепла от а.з. через ПГ к атмосферному воздуху [3].

Каждый из вариантов имеет свои недостатки. Так, например, вариант с теплоотводом к запасу воды при относительно небольшом объеме имеет малое время функционирования. Вариант с теплоотводом к атмосферному воздуху при возможности неограниченного функционирования имеет существенные массо-габаритные характеристики вследствие того, что при атмосферных параметрах плотность воздуха ниже в 1000 раз, теплоемкость ниже в 4 раза, теплопроводность в 10 раз.

Принимая во внимание, что мощность остаточных тепловыделений убывает во времени по показательной функции [4], отвод тепла условно делим на два периода:

- первоначальный период высокоэффективного теплоотвода, имеющий ограниченную продолжительность, в течение которого в качестве конечного поглотителя используется запас испаряемой воды и атмосферный воздух;
- последующий период дорасхолаживания до конечного состояния с теплоотводом только к атмосферному воздуху.

Данное решение позволяет совместить достоинства двух вышеописанных вариантов теплоотвода.

В патенте на полезную модель RU № 109898 от 06.07.2011 описана система аварийного расхолаживания (САР), реализующая один из вариантов комбинированного теплоотода, который позволяет обеспечить расхолаживание РУ до конечного безопасного состояния с уменьшенными массо-габаритными характеристиками системы [5]. На рис. 1 представлена схема САР для РУ типа ВВР выполненной по «судовой» технологии.

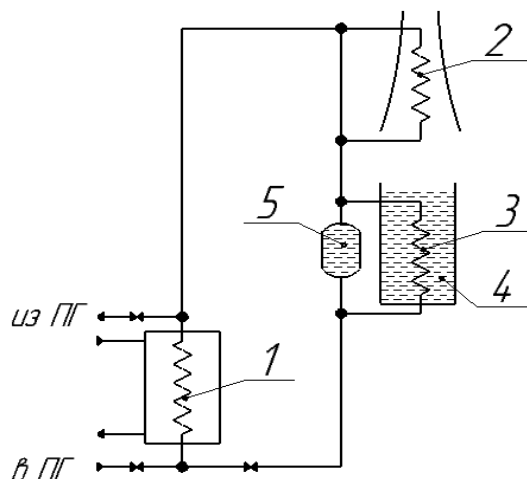


Рис. 1. Схема САР:

1 – парогенератор (ПГ); 2 – воздушный теплообменник-конденсатор (ВТК);
3 – теплообменник конденсатор-испаритель (ТКИ); 4 - цистерна аварийного расхолаживания (ЦАР)

При работе системы устанавливается естественная циркуляция теплоносителя по первому контуру и промежуточному контуру САР, образованному с помощью трубопроводов, соединяющих ПГ по пару и питательной воде с ВТК и ТКИ, что обеспечивает отвод остаточных тепловыделений от активной зоны к конечному поглотителю. Пар из ПГ поступает в ВТК, где частично конденсируется, отдавая тепло атмосферному воздуху. В ТКИ за счет передачи тепла воде цистерны аварийного расхолаживания (ЦАР) происходит конденсация оставшегося пара и доохлаждение конденсата. Затем конденсат стекает в ПГ. Тепло, отводимое ТКИ, аккумулируется в объеме воды ЦАР, а затем отводится за счет испарения воды ЦАР в атмосферу. После исчерпания воды в ЦАР теплоотвод осуществляется только через ВТК.

Одним из основополагающих вопросов при проектировании САР по данной схеме является определение оптимального сочетания параметров теплоотода через ВТК и ТКИ. В зависимости от назначения (электростанция или энергетическая установка судна) и исполнения (наземная станция и плавучий энергоблок) набор условий, определяющий сочетания параметров теплоотода ВТК и ТКИ будет отличаться, поэтому основная проблема заключается в выявлении критериев оптимальности теплоотода и их взаимосвязи для САР данного вида.

Ниже приводится обоснование методики экспресс-оценки параметров комбинированной САР на основе ограниченного объема исходных данных.

При расчетах приняты следующие допущения:

- 1) коэффициенты гидравлического сопротивления не зависят от параметров среды;
- 2) коэффициенты теплоотдачи не меняются от изменения температуры и расходов сред;
- 3) при расчетах теплопередачи в САР принимается постоянная температура воды в ЦАР (точка кипения) и атмосферного воздуха;
- 4) ВТК и ТКИ работают по противоточной схеме с конденсацией пара теплоносителя промежуточного контура;
- 5) площадь ПГ многократно превышает требуемую для аварийного теплоотода.

При приведенных допущениях мощность САР принимает вид линейной функции от температуры теплоносителя первого контура, как показано на рис. 2 и определяется по формуле (1):

$$N_{\text{САР}} = AT_{1\text{к}} - B, \quad (1)$$

где A, B – коэффициенты линейного уравнения для $N_{\text{САР}}$, $T_{1к}$ – температура 1 контура. На рис. 2 представлены следующие обозначения: $T_{\text{НОМ}}$ – температура 1 контура при которой достигается номинальное значение мощности системы аварийного расхолаживания $N_{\text{САР}}^{\text{НОМ}}$, которая, в свою очередь, традиционно определяется, как

$$N_{\text{САР}}^{\text{НОМ}} \approx kN_{\text{НОМ}}$$

где k – нормировочный множитель, отношения номинальной мощности САР к номинальной мощности реакторной установки. По опыту предыдущего проектирования известно, что зависимости от исполнения и назначения установки k находится в диапазоне 1 – 2%.

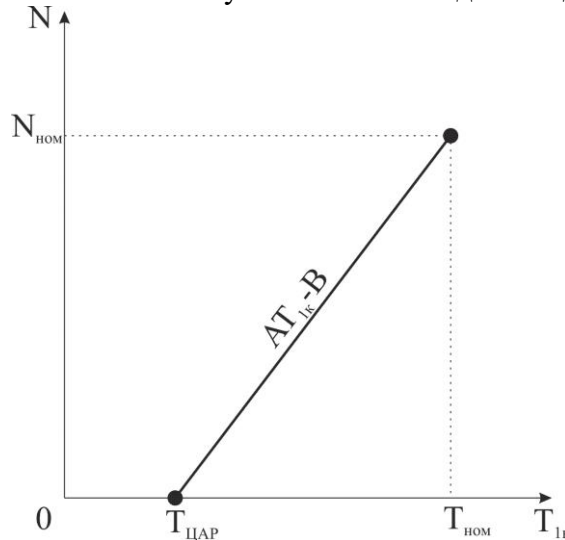


Рис. 2. Функция изменения мощности САР

В соответствии с [6, с. 260] мощность противоточного теплообменника с конденсацией пара равна:

$$Q = Cp_2 \cdot G_2 (T_S - t_2) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{Cp_2 \cdot G_2}}\right) (*)$$

где Cp_2 – теплоемкость охлаждающей среды, G_2 – массовый расход охлаждающей среды, T_S температура пара на выходе из ПГ, t_2 – температура охлаждающей среды на входе в теплообменник, k – коэффициент теплопередачи, F поверхность теплообмена.

мощность противоточного теплообменника с конденсацией с одной стороны и кипением с другой равна:

$$Q = k \cdot F (T_S - t_S)$$

где t_S температура на линии насыщения охлаждающей среды.

мощность противоточного теплообменника с кипением равна

$$Q = Cp_1 \cdot G_1 (T_1 - t_S) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k \cdot F}{Cp_1 \cdot G_1}}\right)$$

Cp_2 – теплоемкость охлаждающей среды, G_2 – массовый расход охлаждающей среды, t_S – температура греющей среды.

С учетом допущения, что площадь ПГ многократно превышает требуемую для аварийного теплоотвода, а компенсация давления в промежуточном контуре паровая, $T_S \approx T_{1к}$. Принимая во внимание, что мощность системы в первоначальный период равна сумме мощностей слагаемых участков ВТК и ТКИ, а вода в ЦАР находится на линии насыщения, запишем уравнение для вычисления мощности САР.

$$N_{\text{САР}} = Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}} (T_{1к} - t_{\text{ВОЗ}}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}}}}\right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot (T_{1к} - t_S) + Cp_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} (T_{1к} - t_S) \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{Cp_{\text{ВОЗ}} \cdot G_{\text{ВОЗ}}}}\right)$$

$$N_{\text{САР}} = N_{\text{ВТК}} + N_{\text{ТКИконд.}} + N_{\text{ТКИдоохл.}}$$

С учетом ранее принятых допущений № 1-3 все параметры, кроме $T_{1к}$, являются постоянными, сгруппируем постоянную и переменную часть уравнения:

$$N_{\text{САР}} = \left[C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \right. \\ \left. \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}}}{C p_{\text{воз}}}} \right) \right] \cdot T_{1к} \\ - \left[C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) \cdot t_{\text{воз}} + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot t_s + C p_{\text{ПК}} \right. \\ \left. \cdot G_{\text{ПК}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}}}} \right) \cdot t_s \right]$$

Принимая условные обозначения

$$A = C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{воз}}}} \right) \\ B = C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ВТК}} \cdot F_{\text{ВТК}}}{C p_{\text{воз}} \cdot G_{\text{воз}}}} \right) \cdot t_{\text{воз}} + k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot (1 - a) \cdot t_s + C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}} \\ \cdot \left(1 - e^{-\frac{k_{\text{ТКИ}} \cdot F_{\text{ТКИ}} \cdot a}{C p_{\text{ПК}} \cdot G_{\text{ПК}}}} \right) \cdot t_s$$

Получим $N_{\text{САР}} = A T_{1к} - B$, что полностью соответствует уравнению (1)

Задаваясь необходимой мощностью САР, и номинальной температурой первого контура можно определить значения коэффициентов А и В уравнения (1).

Определение зависимости мощности САР от температуры 1 контура недостаточно для оптимального распределения теплоотвода между теплообменниками системы. Проведем данные вычисления для ВТК.

Для получения мощностных характеристик ВТК примем допущение, что мощность ВТК должна быть равна остаточным тепловыделениям в момент осушения ЦАР. Данное равенство гарантирует неперевышение (или соблюдение) проектных пределов по давлению первого контура.

$$N_{\text{ост}}(\tau') = N_{\text{ВТК}}(T_{1к}) \quad (2)$$

где τ' – время осушения ЦАР, $T_{1к}$ – температура 1 контура.

С учетом принятых допущений принимаем, что мощностная характеристика ВТК в зависимости от температуры является линейной функцией с коэффициентами линейного уравнения A' , B' (см. рис. 3).

$$N_{\text{ВТК}}(T_{1к}) = A' T_{1к} - B' \quad (3)$$

Определение коэффициентов линейного уравнения A' , B' , позволит в совокупности с известной мощностной характеристикой САР получить оптимальное сочетание характеристик ВТК и ТКИ.

В уравнении (3) кроме коэффициентов A' и B' неизвестным является и время осушения ЦАР, которое, в свою очередь, зависит от мощности ВТК.

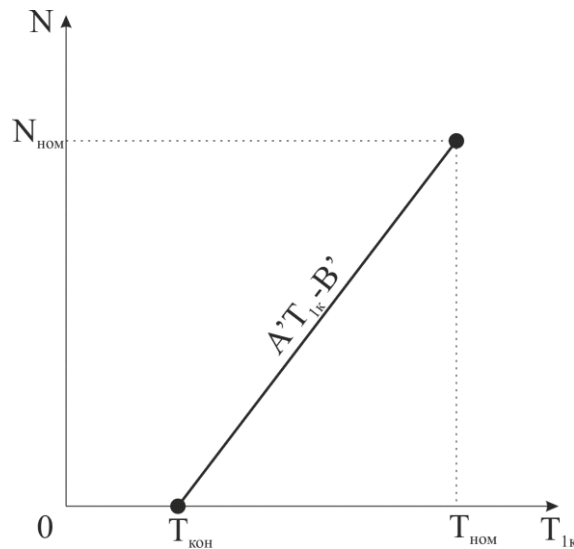


Рис. 3. Функция изменения мощности ВТК

Время осушения ЦАР – τ' , определим из уравнения баланса тепловой энергии, которое для данного вида САР выглядит следующим образом:

$$E_{\text{ЦАР}} = E_{\text{ост}}(\tau') - \int_0^{\tau'} N_{\text{ВТК}} d\tau, \quad (4)$$

где $E_{\text{ЦАР}}$ – энергия, переданная в ЦАР к моменту ее осушения, определяется формулой:

$$E_{\text{ЦАР}} = M_{\text{ЦАР}} \cdot (I'' - I_{\text{н}}),$$

$M_{\text{ЦАР}}$ – масса воды в ЦАР, I'' – удельная энтальпия пара в ЦАР, $I_{\text{н}}$ – удельная энтальпия воды в ЦАР.

Подставляя под интегральное выражение уравнения (4) в соотношение для мощности ВТК приведенное в (3), получим:

$$\int_0^{\tau'} N_{\text{ВТК}} d\tau = \int_0^{\tau'} [A'T(\tau) - B'] d\tau = A' \int_0^{\tau'} T(\tau) d\tau - B'\tau',$$

Дополняя (3) и (4) математической формулировкой

$$0 = A' \cdot t_{\text{воз}} - B',$$

Получим систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{\text{ост}}(\tau') = A' \cdot T(\tau') - B', \\ E_{\text{цар}} = E_{\text{ост}}(\tau') - A' \int_0^{\tau'} T(\tau) d\tau - B' \cdot \tau' \\ B' = t_{\text{воз}} \cdot A', \end{cases} \quad (5)$$

где $T(\tau)$ – функция изменения температуры первого контура в процессе аварии.

Для определения B' , A' и τ' необходимо определить значение функции $T(\tau)$, для чего в экспресс-методике используется следующая модель процесса, имеющая следующие допущения:

- 1) температура по участкам первого контура меняется незначительно;
- 2) масса воды в реакторе меняется незначительно;
- 3) отсутствуют дополнительные стоки и источники тепла, кроме мощности САР и остаточных тепловыделений соответственно.

Тогда уравнение сохранения энергии для первого контура с приведенными допущениями запишем в виде:

$$mC_p \frac{dT}{d\tau} = N_{\text{ост}}(\tau) - N_{\text{САР}}(T),$$

где m – масса воды первого контура, C_p – теплоемкость воды первого контура или с учетом (1):

$$mC_p \frac{dT}{d\tau} = N_{\text{ост}}(\tau) - AT + B;$$

после дополнительных преобразований получим дифференциальное уравнение;

$$\frac{dT}{dt} + \frac{A}{mC_p} T = \frac{1}{mC_p} N_{ост}(\tau) + \frac{B}{mC_p} \quad (6)$$

Обозначим: $\frac{A}{mC_p} = P$,

Уравнение (6) является линейным ДУ 1 порядка, для решения, которого применим метод Лагранжа.

В результате получим:

$$T(\tau) = C_1 e^{-P\tau} \quad (7)$$

где $C_1(\tau) = \frac{1}{mC_p} \int_0^\tau N_{ост}(\tau) e^{P\tau} d\tau + \frac{B}{mC_p} \int_0^\tau e^{P\tau} d\tau$;

$N_{ост}(\tau)$ определим по формуле, приведенной в [4, с. 47]:

$$N_{ост}(\tau) = \left[\frac{0.1}{(\tau + 10)^{0.2}} - \frac{0.087}{(\tau + 2 \cdot 10^7)^{0.2}} - \frac{0.01}{(\tau + 10^6)^{0.2}} - \frac{0.0023}{\left(1 - e^{\frac{-\Delta\tau}{2.9 \cdot 10^5}}\right)} e^{-\frac{\tau}{2.9 \cdot 10^5}} \right] N_{ном}$$

Для получения аналитического решения аппроксимируем данную функцию показательной зависимостью вида

$$\int_0^\tau N_{ост}(\tau) \cdot e^{P\tau} d\tau = C \cdot (1 - e^{-\alpha\tau}) \cdot N_{ном} \quad (8)$$

Подставляя приближенную функцию 8 в 7 и определяя постоянный член получаем функцию $T(\tau)$:

$$T(\tau) = \frac{N_{ном} C}{mC_p} (e^{-P\tau} - e^{-(\alpha+P)\tau}) + \frac{B}{A} (1 - e^{-P\tau}) + T_{ном} e^{-P\tau} \quad (9)$$

Значение интеграла:

$$\int_0^\tau T(\tau) d\tau = \left[\frac{N_{ном} C}{A} - \frac{B}{AP} + \frac{T_{ном}}{P} \right] (1 - e^{-P\tau}) - \frac{N_{ном} C}{mC_p(\alpha+P)} (1 - e^{-(\alpha+P)\tau}) + \frac{B}{A} \tau \quad (10)$$

Подставляя значения интеграла $\int_0^\tau T(\tau) d\tau$ из (10) в (5) получим окончательную систему уравнений:

$$\begin{cases} N_{ост}(\tau') = A' \cdot T_{ном} - B'; \\ M_{ЦАР} \cdot (I'' - I_H) = E_{ост}(\tau') - A' \cdot \left(\left[\frac{N_{ном} C}{A} - \frac{B}{AP} + \frac{T_{ном}}{P} \right] (1 - e^{-P\tau'}) - \frac{N_{ном} C}{mC_p(\alpha+P)} \cdot (1 - e^{-(\alpha+P)\tau'}) + \frac{B}{A} \cdot \tau' \right) + B' \cdot \tau' \\ 0 = A' \cdot t_{воз} - B' \end{cases} \quad (11)$$

Решая систему уравнений (11), можно получить значения коэффициентов уравнения для ВТК (3) и время работы ТКИ (выпаривания ЦАР). Зная общую мощностную характеристику САР и характеристику ВТК, мощностная характеристика ТКИ получается как их разность

$$N_{ТКИ}(T_{1к}) = (A - A') \cdot T_{1к} - B + B'$$

На рис. 4 представлены мощностные характеристики САР с комбинированным теплоотводом, полученные по описанной экспресс-методике в сравнении с характеристиками, полученными прямым теплогидравлическим расчетом для РУ.

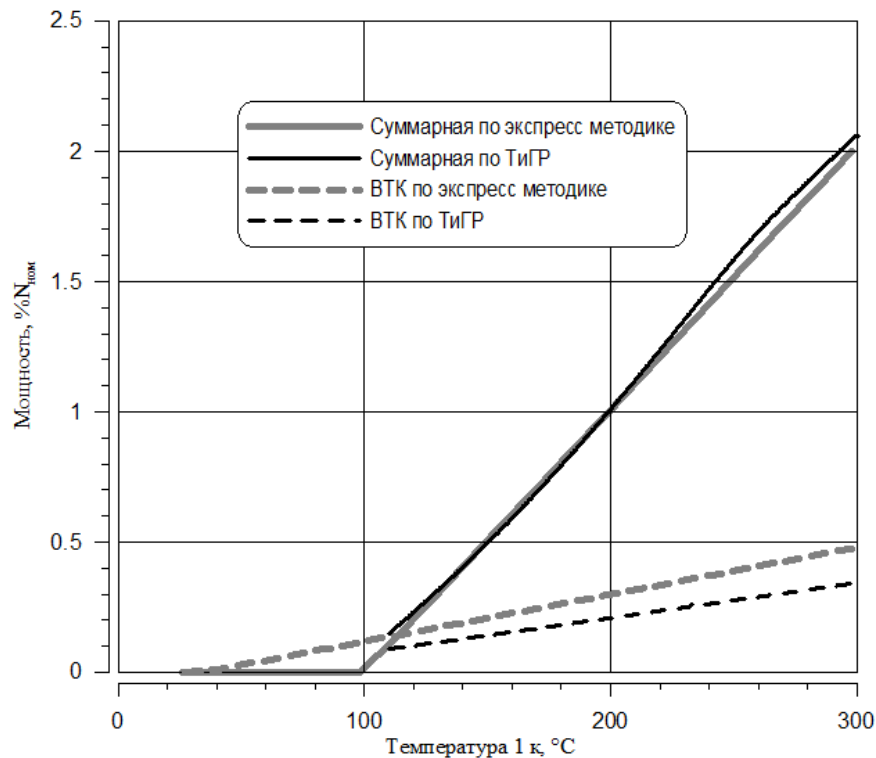


Рис. 4. Мощностная характеристика ВТК и САР в целом

Из рис. 4 видно, что характеристики, определенные по экспресс-методике и полученные в ходе прямого теплогидравлического расчета, совпадают качественно и количественно. Имеющиеся различия в мощности ВТК связаны с рядом допущений:

- проектный предел по давлению первого контура реально достигается при более высокой температуре по сравнению с принятой в методике;
- после осушения ЦАР установка находится в расхоложенном состоянии при температуре ниже номинальной температуры первого контура.

Для снижения консерватизма экспресс-оценок можно принять следующие меры:

- отказ от «традиционного выбора» номинальной мощности САР на уровне $\approx 2\%$ $N_{\text{ном}}$ реактора и уточнение данного значения в соответствии с критериями безопасности, выявленными при анализе.
- учет влияния пассивного рассеяния тепла от реакторной установки в окружающую среду;
- разработка обобщенных критериев оптимизации конструкции САР на основе технико-экономических расчетов.

Заключение

В статье предложен оригинальный вариант САР с комбинированным теплоотводом к запасу воды и атмосферному воздуху. Разработана методика экспресс-оценки мощностных характеристик оборудования САР. Методика дает качественное описание процесса аварийного теплоотвода и позволяет получить количественные оценки с приемлемой точностью.

Проведено сравнение результатов экспресс оценок и теплогидравлического расчета САР, которые показывают хорошее качественное и количественное соответствие полученных результатов. Экспресс-методика дает более консервативные результаты. Приведены соображения о дальнейшем развитии данной методики.

Библиографический список

1. Advances in small modular reactor technology developments. 2016 Edition. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS). – URL: <http://aris.iaea.org>.
2. Пат. № 78600 Российская федерация, МКП G21C15/18. Система аварийного отвода тепла / М.А. Большухин, В.И. Полуничев, В.И. Печенкин, А.Н. Соколов; заявитель и патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов» - № 2008129286; заявл. 16.07.2008 опубл. 27.11.2008, Бюл. № 33.
3. Пат. 2002320 Российская Федерация МПК G21C15/18. Система пассивного отвода тепла водо-водяных энергетических реакторов / В.А. Голонцов, М.А. Смирнов, М.В. Скорлыгин; заявитель и патентообладатель Опытное конструкторское бюро «Гидропресс» - № 2002320; заявл. 16.05.91; опубл. 30.10.93, Бюл. № 39 – 40 с.
4. **Федоров, Н.Д.** Краткий справочник инженера-физика. Ядерная физика. Атомная физика / Н.Д.Федоров. – М.: Госатомиздат, 1961. – 508 с.
5. Пат. 109898 Российская Федерация, МПК G21C15/18. Система аварийного расхолаживания / Д.Л. Зверев, А.Н. Соколов, А.Н. Пахомов, А.М. Хизбуллин; заявитель и патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов» - № 2011128179/07; заявл. 06.07.2001; опубл. 27.10.2011, Бюл. № 30.
6. **Михеев, М.А.** Основы теплопередачи / М.А.Михеев, И.М.Михеева. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

*Дата поступления
в редакцию: 02.10.2018*

A.N. Sokolov², V.I. Polunichev², V.V. Andreev¹, A.A. Barinov¹, S.A. Mikhay¹

**THE METHOD OF RAPID ASSESSMENT
OF INNOVATIVE EMERGENCY COOLING SYSTEMS**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alekseev¹,
JSC OKBM AFRICANTOV, Nizhny Novgorod²

Purpose: Authors developed the methodology of rapid assessment of innovative passive heat removal system for pressurized water reactors. The work presents the original system of combined residual heat removal to the water-supply (with the use of condenser-boiler heat exchanger) and to ambient air (through the condenser-convective heat exchanger).

Design/methodology/approach: A theoretical framework integrates basic models for heat exchangers, approximation of system thermal capacity in the frame of proposed assumptions and analytical integration of simplified equations.

Findings: The analytical solution obtained shows good agreement with more complicated calculations with the use of numerical tool. The proposed method of simplified estimation is effective for general design needs.

Research limitations/implications: The study provides assumptions and simplifications that are acceptable in the postulated scenario. The method developed is applicable for rough estimations and optimization procedures. Approaches of further methodology development are defined for decreasing of conservative margins.

Keywords: passive heat removal system, emergency cooling heat exchanger, steam generator, blackout, emergency cooling tank, pressurized water reactor.