



УДК: 621.039.58

DOI: 10.26277/SECNRS.2020.97.3.003

© 2020. Все права защищены.

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДАВЛЕНИЯ В ПЕРВОМ КОНТУРЕ В УСЛОВИЯХ БОЛЬШИХ ТЕЧЕЙ В МОДЕЛЯХ ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА РОСТЕХНАДЗОРА

Кавун О. Ю.\* (kavun@secnrs.ru),  
Пипченко Г. Р.\* (pipchenko@secnrs.ru)

Статья поступила в редакцию 13 июля 2020 г.

*В случае возникновения запроектных аварий на энергоблоках АЭС в Информационно-аналитическом центре Ростехнадзора собираются эксперты рабочих групп. В рабочие группы входят эксперты по технологическому оборудованию реакторной установки и радиационной безопасности. Их задачами являются оценка текущего состояния энергоблока и прогноз развития аварии. Для выполнения прогноза необходимо использовать специальные модели, обеспечивающие высокую скорость расчета.*

*Для моделирования реакторной установки можно применять и программные средства реалистической оценки, преимуществом которых является их точность. Однако скорость расчета по таким программным средствам недостаточна для прогнозирования аварии. К тому же во время аварийного реагирования эксперты не обладают всей исчерпывающей информацией об аварийном энергоблоке. Это вынуждает выполнять варианты расчета, что приводит к необходимости быстрого, но менее точного расчета.*

*К другой группе относятся программные средства, использующие приближение гомогенного течения теплоносителя. Достоинство программных средств данного класса – быстрый расчет достаточно подробной модели реакторной установки. Их основной недостаток – весьма грубое моделирование теплогидравлических процессов в реакторной установке в условиях осушения первого контура.*

*В данной статье представлена методика моделирования аварийных режимов с большими течениями теплоносителя из главного циркуляционного трубопровода энергоблока АЭС с ВВЭР. Методика предназначена для вычисления давления в первом контуре при использовании модели гомогенного течения теплоносителя.*

*Описанная методика реализована в моделях для экспресс-оценки функций безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР. Эти модели применяются экспертами Информационно-аналитического центра Ростехнадзора во время аварийного реагирования. Методика позволяет обеспечить необходимую скорость расчета и численную устойчивость при моделировании аварийных режимов с большими течениями теплоносителя из главного циркуляционного трубопровода непосредственно во время аварийного реагирования.*

► **Ключевые слова:** моделирование, течь, теплоноситель, ВВЭР, экспресс-оценка, гомогенная модель, методика.

\* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

## DEVELOPMENT OF METHODOLOGY FOR PRIMARY CIRCUIT PRESSURE CALCULATIONS IN CASE OF LARGE BREAK LOSS OF COOLANT ACCIDENT IN MODELS FOR RAPID ASSESSMENT FOR INFORMATION ANALYTICAL CENTER OF ROSTECHNADZOR

Kavun O. Y.\*, Pipchenko G. R.\*

© Article is received on July 13, 2020

*In case of beyond design basis accidents at NPP power units with VVER the experts of work groups are gathered in Information analytical center of Rostechndzor. These working groups include experts on reactor plant technological equipments and radiological safety. Their tasks embrace current situation diagnosis and prognosis of accident progress. To perform prognosis it is required to use the special models providing high calculation rate.*

*For the reactor plant modeling it is possible to use best-estimate codes which advantage is high precision. However, calculation rate of these codes is not enough to accident prognosis. Besides, during the accident experts do not have comprehensive information about emergency power unit. Necessity of fast rather than precise calculation forces to perform variant calculations.*

*The other group of codes employs homogeneous coolant flow approach. The advantage of these codes is high calculation rate of quite detailed reactor plant model. Main disadvantage is relatively rough modeling in case of loss of coolant accident.*

*A methodology of modeling accidents with large break loss of coolant accident from the main coolant circuit of the NPP with VVER type power unit is presented in this article. The methodology is aimed at calculation of the primary circuit pressure using a model of a homogeneous coolant flow.*

*The described methodology is implemented in models for rapid-assessment of VVER type power unit's safety functions. These models are applied by Information analytical center of Rostechndzor experts during emergency response. The methodology provides necessary speed of calculation and numerical stability in the simulation of accidents with large break loss of coolant accident from the main coolant circuit.*

► **Keywords:** modeling, break, coolant, VVER, rapid assessment, homogeneous model, methodology.

\* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

### Введение

В условиях аварий на энергоблоках АЭС перед экспертами Информационно-аналитического центра (ИАЦ) Ростехнадзора стоят задачи выполнения оценки текущего состояния аварийного энергоблока, а также прогнозирования развития аварии.

В условиях аварийной ситуации может реализоваться любой сценарий, в том числе и заранее не рассчитанный. Поэтому для повышения эффективности работы экспертов в условиях чрезвычайных ситуаций необходимо иметь возможность осуществлять оперативные расчетные оценки значений параметров АЭС, которые характеризуют состояние функций безопасности, а также выполнять прогнозные расчеты аварийного сценария, реализующегося на энергоблоке АЭС [1].

Для обеспечения достаточной скорости расчета в условиях аварийного реагирования эксперты ИАЦ Ростехнадзора используют специальные модели энергоблоков. Эти модели разработаны на базе программного комплекса «РАДУГА-ЭУ» [2]. Моделирование реакторной установки (РУ) осуществляется посредством программного средства (ПС) «Rainbow-TRP» [3].

При моделировании аварийных режимов, сопровождающихся большой течью теплоносителя первого контура на энергоблоках АЭС с ВВЭР, было обнаружено, что ПС «Rainbow-TRP» [3] не обеспечивает корректный расчет давления в первом контуре. При этом возникает численная неустойчивость.

Поэтому появилась необходимость усовершенствования методики расчета давления в первом контуре РУ энергоблоков АЭС с ВВЭР в условиях больших течей теплоносителя вплоть до гильотинного разрыва с двухсторонним истечением.

### Постановка задачи

Моделирование РУ осуществляется посредством ПС «Rainbow-TRP» [3]. В основе решения уравнений гидродинамики этого ПС лежит приближение гомогенного течения теплоносителя.

Основная особенность модели гомогенного течения жидкости – решение трех уравнений гидродинамики: неразрывности, энергии и движения в предположении, что время установления распределения давления в расчетных узлах РУ происходит мгновенно в пределах шага интегрирования.

Уравнение неразрывности имеет вид:

$$\frac{d(\rho s)}{dt} + \frac{d(\rho s v)}{dx} = 0, \quad (1)$$

где:

$v$  – линейная скорость теплоносителя вдоль оси канала;

$\rho$  – плотность теплоносителя;

$s$  – площадь проходного сечения канала;

$x$  – координата, направление которой совпадает с осью канала.

Уравнение неразрывности решается для замкнутого контура в целом.

Уравнение движения:

$$\frac{d(\rho v s)}{dt} + \frac{d(\rho s v^2)}{dx} = -\rho g s \frac{dh}{dx} - \tau_0 \Pi - s \frac{dP}{dx}, \quad (2)$$

где:

$P$  – давление;

$h$  – высотная отметка;

$g$  – единичная массовая сила тяжести;

$\tau_0$  – касательное напряжение;

$\Pi$  – периметр канала.

Решение уравнения производится при следующих допущениях:

- поток теплоносителя гомогенный;
- в пределах шага интегрирования жидкость несжимаема;
- стенки жесткие, постоянного сечения.

Следовательно:  $\frac{ds}{dt} = 0$ ;  $\frac{d(\rho s)}{dt} = 0$ ;  $\frac{ds}{dx} = 0$ ,

откуда из уравнения неразрывности следует:

$$\frac{d(\rho v s)}{dx} = 0 \Rightarrow \frac{dG}{dx} = 0,$$

где:  $G = \rho v s$  – массовый расход теплоносителя по каналу.

Уравнение сохранения энергии для отдельного контрольного объема имеет вид:

$$M \frac{dH}{dt} = \sum_{i=1}^k G_{\text{вх}} H_{\text{вх}} - \sum_{i=1}^m G_{\text{вых}} H_{\text{вых}}, \quad (3)$$

где:

$M$  – масса теплоносителя в контрольном объеме;

$H$  – средняя энтальпия теплоносителя в контрольном объеме;

$G_{\text{вх}}$  – массовый расход теплоносителя, входящего в контрольный объем;

$H_{\text{вх}}$  – энтальпия теплоносителя, входящего в контрольный объем;

$G_{\text{вых}}$  – массовый расход теплоносителя, выходящего из контрольного объема;

$H_{\text{вых}}$  – энтальпия теплоносителя, выходящего из контрольного объема.

При решении уравнения (3) принимается допущение: теплоноситель, входящий в контрольный объем, мгновенно перемешивается с теплоносителем в объеме, то есть:  $H = H_{\text{вых}}$ .

Изменение массы теплоносителя в контуре вследствие течей и подпиток в первый контур передается в компенсатор давления (КД).

Для вычисления давления в КД используется реализованная в ПС “Rainbow TRP” модель КД [2] в приближении трех расчетных объемов.

Расчетная схема модели КД показана на рис. 1.

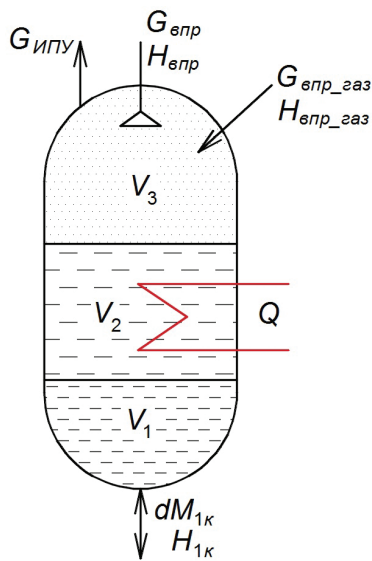


Рис. 1. Расчетная схема модели компенсатора давления

Обозначения:

$V_1$  – первый расчетный объем;

$V_2$  – второй расчетный объем: в стационарном состоянии вода на линии насыщения;

$V_3$  – парогазовый объем: в стационарном состоянии пар находится на линии насыщения при парциальном давлении;

$dM_{1к}$  – изменение массы воды, поступающей в / из контура за шаг интегрирования;

$H_{1к}$  – энтальпия теплоносителя в элементе контура, связанного с компенсационным объемом;

$G_{\text{иппу}}$  – расход через импульсное предохранительное устройство;

$G_{\text{впр}}$  – расход впрыска воды в КД;

$H_{\text{впр}}$  – энтальпия воды, впрыскиваемой в КД;

$G_{\text{впр\_газ}}$  – расход впрыска неконденсирующегося газа в КД;

$H_{\text{впр\_газ}}$  – энтальпия неконденсирующегося газа, впрыскиваемого в КД;

$Q$  – тепловая мощность, подводимая ко второму водяному объему от электронагревателей КД.

Решение уравнения состояния основывается на предположении о сохранении объема КД:

$$dV = dV_1 + dV_2 + dV_3 = 0; \quad (4)$$

$$dV = d\left(\frac{M}{\rho}\right) = \frac{dM}{\rho} - \frac{M}{\rho^2} \left( \left(\frac{\partial \rho}{\partial P}\right)_H dP + \left(\frac{\partial \rho}{\partial H}\right)_P dH \right), \quad (5)$$

где:

$M$  – масса воды в объеме;

$\rho$  – плотность воды в объеме;

$H$  – полная энтальпия воды в объеме;

$P$  – полное давление в КД.

Откуда:

$$dP = \frac{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{M_i}{\rho} - \frac{M_i}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial H}\right)_P dH_i \right)}{\sum_{i=1}^3 \left( \frac{M_i}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial P}\right)_H \right)}. \quad (6)$$

Для обеспечения нерасходимости решения производится вариация полученного давления для выполнения условия (4):  $V_1 + V_2 + V_3 = const$ .

Давление в первом контуре является важной характеристикой, определяющей такие параметры, как расход теплоносителя в течь, расход подпитки от насосов системы аварийного расхолаживания активной зоны, которые, в свою очередь, определяют массу теплоносителя в циркуляционном контуре и условия теплоотвода от активной зоны. Поэтому неправильный расчет давления в первом контуре не позволит дать корректный прогноз развития аварии.

В ПС “Rainbow-TRP” [3] была реализована методика моделирования теплогидравлических процессов в РУ в условиях течей из главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), однако она позволяла моделировать ограниченный набор режимов с течами. При проведении множества сравнительных расчетов аварийных режимов с течами из первого контура было обнаружено, что для больших течей эта методика расчета оказалась численно неустойчивой.

На рис. 2 в качестве примера показан график изменения давления в первом контуре энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 при большой течи теплоносителя из ГЦТ, полученный по модели, разработанной на базе программного комплекса «РАДУГА-ЭУ» [2].

На рис. 2 в течение всего расчета наблюдаются периодические скачки давления. Причиной тому является нелинейность зависимости давления в первом контуре от распределения массы теплоносителя

в циркуляционном контуре из-за существенного изменения плотности теплоносителя при снижении давления в первом контуре в результате течи.

### Методика расчета давления

В основе методики лежит закон сохранения массы в циркуляционном контуре. Для поиска решения используется метод половинного деления, позволяющий обеспечить сходимость решения.

На рис. 3 показана конфигурация нодализационной схемы первого контура РУ с ВВЭР-1000 (на рисунке изображена только одна петля из четырех), реализованная в моделях для экспресс-оценки состояния функций безопасности энергоблоков АЭС с ВВЭР.

В методике используется допущение: давление во всех точках ГЦТ и реакторе принимается одинаковым и равным давлению в точке подсоединения КД к ГЦТ (элемент 3 на рис. 3).

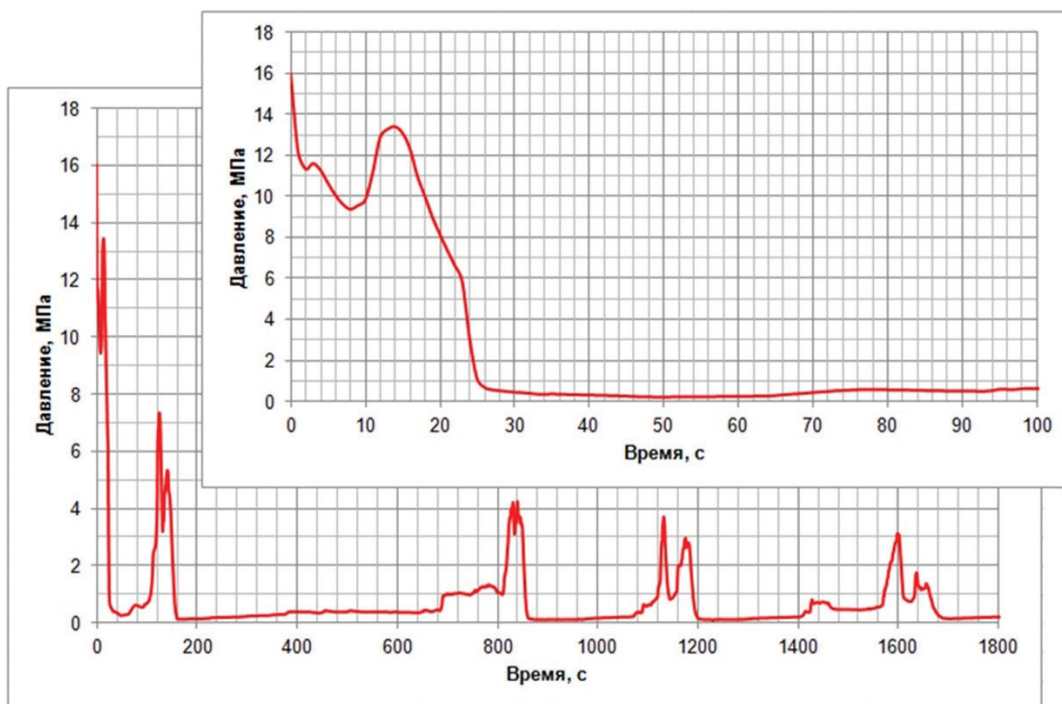


Рис. 2. График изменения давления в первом контуре ВВЭР-1000 в условиях большой течи теплоносителя первого контура

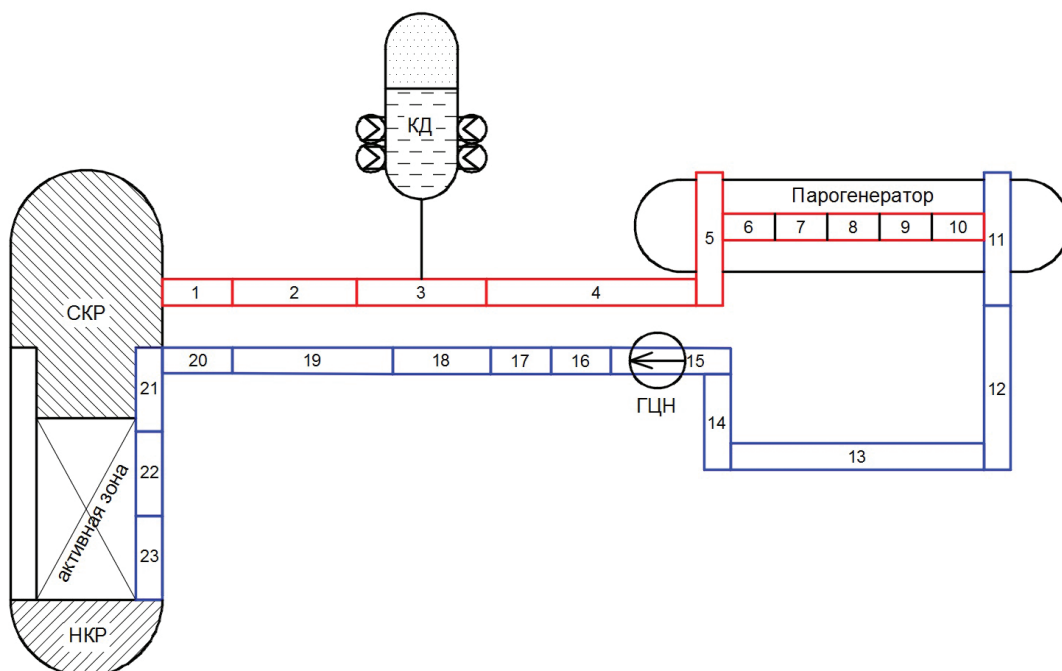


Рис. 3. Нодализационная схема первого контура (одна петля)

Суть метода заключается в подборе давления в первом контуре путем варьирования массы теплоносителя в контуре. Проверка баланса массы осуществляется при решении уравнения  $\Delta(P \pm \epsilon) = 0$  с заданной погрешностью  $\epsilon$ , где:

$$\Delta(P) = \frac{P - P_{1к}(\delta m(P))}{P}$$

– отклонение варьируемого давления ( $P$ ) от давления в первом контуре ( $P_{1к}$ ), соответствующего изменению массы воды в контуре  $\delta m(P)$ .

В общем случае псевдографик функции  $\Delta(P)$  имеет вид, показанный на рис. 4. Давление в контуре зависит от распределения массы теплоносителя по контуру нелинейно. В исходной методике решение уравнения  $\Delta(P) = 0$  осуществлялось итерационным способом. Однако для режимов с большими течами этот способ не обеспечивает сходимости решения, что и демонстрирует график на рис. 2. Область применения исходной методики ограничена линейным участком.

Ниже представлено описание алгоритма расчета давления в первом контуре в условиях больших течей из ГЦТ.

Шаг 1. Определение интервала поиска решения (рис. 5).

Границы интервала поиска решения для первой итерации ( $\pm 7\%$ ) приняты из опыта решения задач поиска давления при малых течах из первого контура, где изменение давления за шаг интегрирования относительно мало.

Шаг 2. Расчет баланса массы теплоносителя в первом контуре.

По формуле (7) вычисляются значения массы теплоносителя в первом контуре, соответствующие значениям давления левой и правой границ интервала поиска решения:

$$m_{\text{лев/прав}}(P_{\text{лев/прав}}) = \sum_i V_j \cdot \rho_j(P_{\text{лев/прав}}, h), \quad (7)$$

где:

$V_j$  – объем  $j$ -го элемента циркуляционного контура;

$\rho_j(P, h)$  – плотность воды в  $j$ -ом элементе при давлении  $P$  и удельной энтальпии  $h$ ;

$P_{\text{лев/прав}}$  – значения давления, соответствующего левой/правой границе интервала поиска решения.

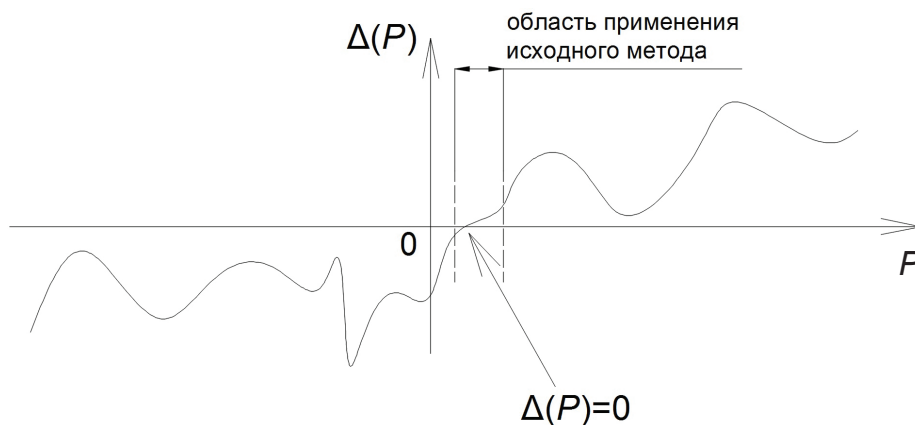


Рис. 4. Псевдографик функции  $\Delta(P)$

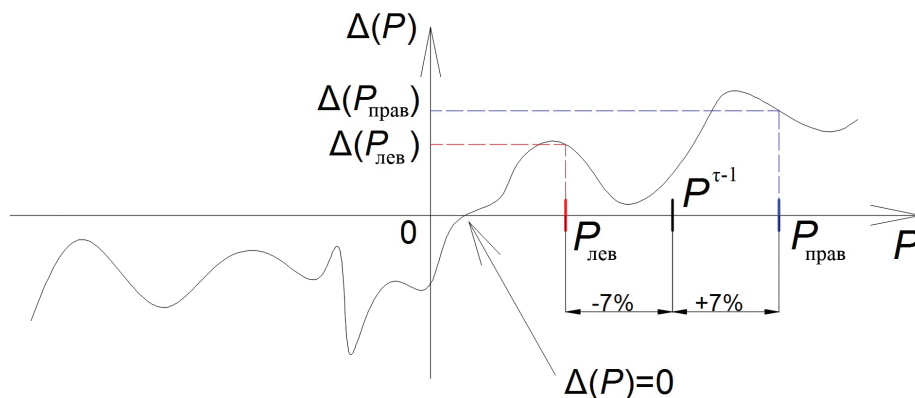


Рис. 5. Определение границ интервала, содержащего решение, где:  $P^{\tau-1}$  – давление в первом контуре на предыдущем шаге интегрирования

Для левой и правой границ вычисляется разница массы воды в контуре на текущем и предыдущих временных шагах:

$$\delta m_{\text{лев/прав}}(P_{\text{лев/прав}}^{\tau}) = m(P^{\tau-1}) - m_{\text{лев/прав}}(P_{\text{лев/прав}}^{\tau}), \quad (8)$$

где:

$P^{\tau-1}$  – давление в первом контуре на предыдущем временном шаге;

$P^{\tau}$  – давление в первом контуре на текущем временном шаге, соответствующее значениям левой и правой границ интервала поиска решения;

$m(P^{\tau-1})$  – масса воды в первом контуре на предыдущем шаге интегрирования.

Шаг 3. Расчет давления в первом контуре.

Определяется давление в КД согласно описанной выше методике моделирования КД [2].

По найденному значению давления в КД по формуле (9) рассчитывается давление в элементе ГЦТ, к которому подключен КД:

$$P_{1к}(\delta m) = \rho g(z+l) + P - \frac{G_{\text{КД-ГЦТ}}^2}{2\rho S^2} \left( \frac{\lambda_{\text{КД-ГЦТ}}}{d} + \sum \xi \right), \quad (9)$$

где:

$\rho$  – плотность воды в КД;

$z$  – высотная отметка расположения дна КД;

$l$  – уровень воды в КД;

$P$  – давление в КД;

$S$  – площадь проходного сечения соединительного трубопровода КД с ГЦТ;

$\lambda$  – коэффициент трения;

$l_{\text{КД-ГЦТ}}$  – длина соединительного трубопровода;

$d$  – внутренний диаметр соединительного трубопровода;

$\zeta$  – коэффициент местного гидравлического сопротивления соединительного трубопровода;

$$G_{\text{КД-ГЦТ}} = \frac{\delta m(P^{\tau})}{\Delta \tau} \text{ – расход воды между КД и ГЦТ.}$$

Шаг 4. Определение отклонений.

По формуле (10) вычисляется отклонение давления в первом контуре  $P_{1к}(\delta m)$  от принятого на шаге 1.

$$\Delta_{\text{лев/прав}} = \frac{P_{\text{лев/прав}} - P_{1к}(\delta m_{\text{лев/прав}})}{P_{\text{лев/прав}}}, \quad (10)$$

где  $P_{1к}(\delta m_{\text{лев/прав}})$  – давление в первом контуре, соответствующее изменению массы воды, найденное для левой и правой границ интервала поиска решения.

Шаг 5. Определение знаков полученных отклонений.

Если знаки отклонений совпадают:  $\Delta_{\text{лев}} \cdot \Delta_{\text{прав}} > 0$ , то искомое давление находится вне пределов рассматриваемого интервала. В этом случае производится расширение интервала поиска давления в первом контуре на 7 % от значений, принятых на шаге 1, и переход к шагу 2.

Если отклонения разных знаков:  $\Delta_{\text{лев}} \cdot \Delta_{\text{прав}} < 0$ , значит, искомое давление лежит в рассматриваемом интервале.

После нахождения интервала поиска решения дальнейшее определение давления в первом контуре производится методом половинного деления до достижения заданной точности  $|\Delta| \leq \varepsilon$ .

Блок-схема описанного алгоритма расчета давления в первом контуре в условиях больших течей из ГЦТ показана на рис. 6.

Данная методика была реализована в ПС “Rainbow-TRP” [3]. Ниже приведен пример сравнительного расчета с ПС “ATHLET (версия 2.1A\_A)” [4].

На рис. 7 приведен график изменения давления в первом контуре энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 в условиях большой течи теплоносителя из ГЦТ на входе в реактор для двух временных интервалов.

Представленный на рис. 7 график свидетельствует о том, что разработанная методика позволяет обеспечить численную устойчивость расчета. На всем расчетном интервале отсутствуют скачки давления, характерные для методики [2] (рис. 2).

Разумеется, гомогенная модель течения двухфазной жидкости, используемая в ПС “Rainbow-TRP” [3], имеет свои особенности. В частности, в результате разрыва ГЦТ происходит снижение давления, что приводит к появлению пара в контуре. В ПС “ATHLET (версия 2.1A\_A)” [4] эффекты, связанные с разделением паровой и водяной фаз и теплообмена между ними, учитываются более корректно, поэтому в контуре образуется больше пара, препятствующего снижению давления. В ПС “Rainbow-TRP” [3] при подаче воды от гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны и насосов пар в контуре конденсируется лучше, чем в ПС “ATHLET (версия 2.1A\_A)” [4], что и приводит к более быстрому снижению давления в первом контуре. Однако для целей аварийного реагирования наблюдаемые отличия не оказывают определяющего влияния. Так, например, время снижения давления до 4 атм, посчитанное по двум ПС, отличается всего на 14 с (24 с – “ATHLET (версия 2.1A\_A)” [4], 10 с – “Rainbow-TRP” [3]), а отличие величины давления составляет порядка 1 атм, что не оказывает существенного влияния на характер протекания аварии.

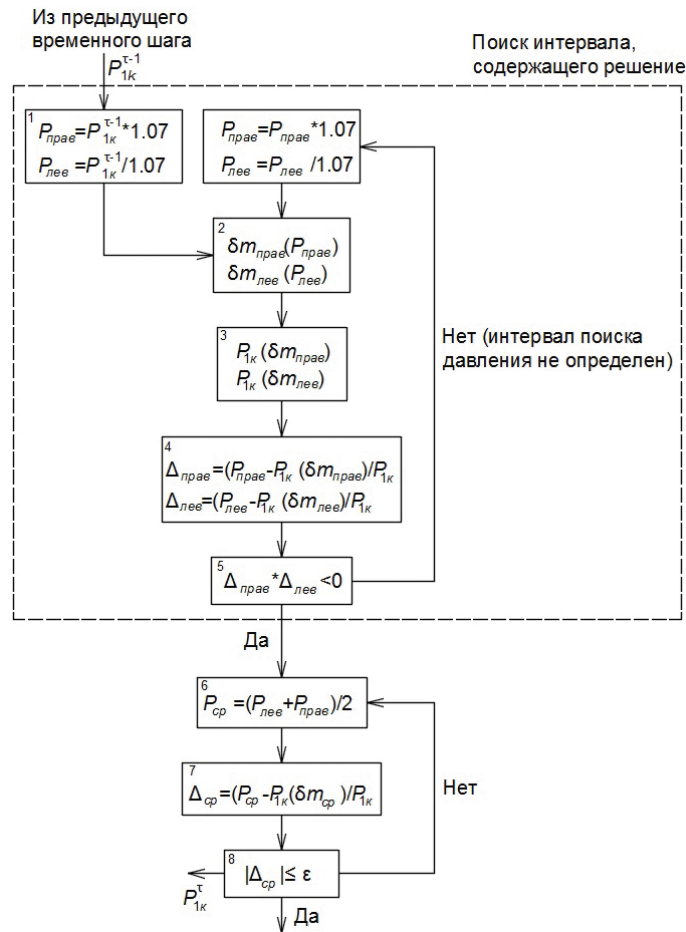


Рис. 6. Блок-схема алгоритма расчета давления в первом контуре энергоблоков АЭС с ВВЭР в условиях больших течей теплоносителя из главного циркуляционного трубопровода

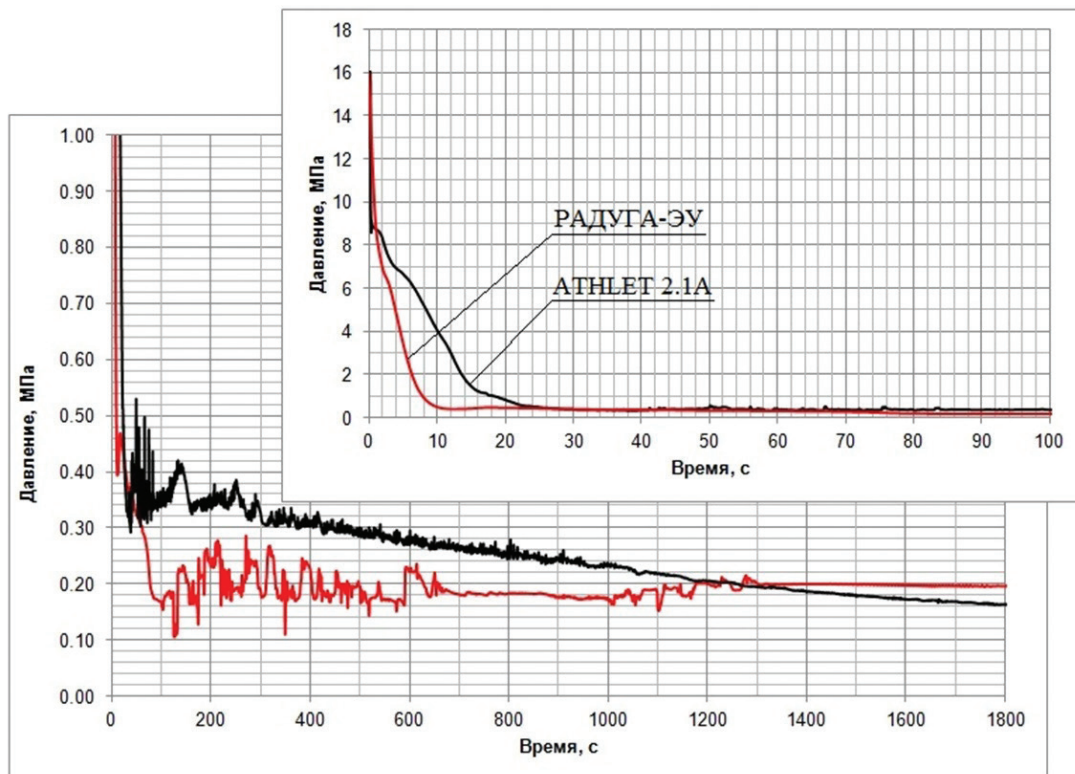


Рис. 7. График давления в первом контуре при большой течи теплоносителя из главного циркуляционного трубопровода



### Заключение

По результатам тестовых расчетов режимов с течью теплоносителя, вплоть до гильотинного разрыва ГЦТ с двухсторонним истечением, разработанная методика расчета давления в первом контуре энергоблоков АЭС с ВВЭР обеспечивает

устойчивость расчета, отсутствуют скачки давления в первом контуре, а также сохраняется достаточное быстродействие всего программного комплекса «РАДУГА-ЭУ» [2]. Все это в совокупности позволяет моделировать режимы с большими течами теплоносителя из ГЦТ в условиях аварийного реагирования ИАЦ Ростехнадзора.

### Литература

1. Кавун О. Ю., Поликарпова А. М., Пипченко Г. Р. Разработка моделей для экспресс-оценки состояния критических функций безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР // Ядерная и радиационная безопасность. 2018. № 1 (87). С. 10–19.
2. Кавун О. Ю. Методика моделирования динамики энергоблока АЭС, реализованная в программном комплексе РАДУГА-ЭУ // Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов. М., 1999. Вып. 2. С. 17–39.
3. Кавун О. Ю., Таранов Г. С., Никитин А. Ю., Куно М. Я., Фейман В. Г. Программное средство “Rainbow-TRP” // Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам, товарным знакам. Свидетельство № 2011619655 от 22 декабря 2011 г.
4. Austregesilo H., Bals C., Hora A., Lerchl G., Romstedt P. Программное средство “ATHLET (версия 2.1A\_A)”. Аттестационный паспорт на программное средство № 350 от 17 апреля 2014 г.

### References

1. Kavun O. Yu., Polikarpova A. M., Pipchenko G. R. Razrabotka modeley dlya ekspress-otsenki sostoyaniya kriticheskikh funktsiy bezopasnosti AES s reaktorami tipa VVER [Development of Models for Rapid Assessment of Critical Safety Functions' Status of Nuclear Power Plants with VVER Type Reactors]. Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost – Nuclear and Radiation Safety, 2018, no. 1 (87), pp. 10–19.
2. Kavun O. Yu. Metodika modelirovaniya dinamiki energobloka AES, realizovannaya v programmnom komplekse RADUGA-EU [Method for Modeling the Dynamics of the Power Unit of Nuclear Power Plants, Implemented in the RAINBOW-EU Software]. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Seriya: Fizika yadernykh reaktorov – Questions of Atomic Science and Technology. Ser.: Physics of Nuclear Reactors, 1999, vol. 2, pp. 17–39.
3. Kavun O. Yu., Taranov G. S., Nikitin A. Yu., Kuno M. Ya., Feyman V. G. Software “Rainbow-TRP”. Certificate No. 2011619655 issued 22.12.2011.
4. Austregesilo H., Bals C., Hora A., Lerchl G., Romstedt P. Software “ATHLET (version 2.1A\_A)”. Certificate No. 350 issued 17.04.2014.

