

УДК 621.039.514

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ РАСХОДА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ДВУХКОНТУРНОЙ АЭС С РЕАКТОРОМ ВВЭР СКД*

© 2015 г.

**Чистов А.С.¹, Савихин О.Г.²,
Овчинников В.Ф.¹, Николаев М.Я.¹**

*¹Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

*²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

chistov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 10.06.2015

Проведен расчетный анализ устойчивости расхода теплоносителя в двухконтурной АЭС с реактором на быстрых нейтронах, охлаждаемым паром сверхкритических параметров. Исследование проводится методом D-разбиения в плоскости определяющих устойчивость параметров на основе одномерной гомогенной модели процессов теплопереноса в циркуляционном контуре АЭС. Граница D-разбиения строится с использованием методики численного расчета передаточной функции, входящей в характеристическое уравнение математической модели.

Исследована устойчивость расхода в первом замкнутом контуре АЭС, во втором контуре парогенератора, а также в параллельных каналах чехловых тепловыделяющих сборок активной зоны реактора с учетом неравномерности энерговыделения по различным группам сборок. Установлено, что устойчивость расхода теплоносителя в номинальном режиме обеспечена с запасом.

Ключевые слова: активная зона реактора, контур циркуляции теплоносителя, область устойчивости, парогенератор, сверхкритическое давление пара, скользящий режим регулирования турбины, теплоноситель, теплогидравлическая неустойчивость, чехловая тепловыделяющая сборка.

Введение

В рамках международной программы развития технологии быстрых водоохлаждаемых реакторов в последние 10 лет в России ведутся разработки проектов АЭС с реакторами, охлаждаемыми водой сверхкритического давления (СКД). Проекты основаны на хорошо освоенной в российской ядерной энергетике технологии

* Выполнено при частичном финансировании Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8), Минобрнауки РФ (соглашение от 27.08.2013 №02.В49.21.0003 между Минобрнауки РФ и ННГУ) и РФФИ (гранты 13-08-00785 а, 15-48-02391 р_поволжье_а).

водо-водяных энергетических реакторов (ВВЭР) и объединяются под общим названием ВВЭР СКД [1, 2].

Одной из отличительных особенностей ВВЭР СКД является существенное увеличение подогрева теплоносителя в активной зоне: от 280 до 540 °С по сравнению с подогревом в ВВЭР от 290 до 323 °С. Это дает возможность получить пар сверхкритических параметров для турбоустановки, а также существенно уменьшить значения расходов теплоносителя, проходные сечения трубопроводов, мощности и размеры главных циркуляционных насосов (ГЦН), количество петель и, как следствие, повысить КПД станции и сократить затраты при строительстве и эксплуатации АЭС [2].

Однако большие значения подогрева и изменения плотности теплоносителя в ВВЭР СКД могут привести к возникновению теплогидравлической неустойчивости [3, 4]. Ввиду тождественности основных механизмов неустойчивости в энергоустановках при докритических и сверхкритических давлениях задача обеспечения устойчивости номинального режима ВВЭР СКД является столь же актуальной [5], как и для кипящих реакторов. Опыт проектирования и эксплуатации последних указывает на необходимость проведения исследований по устойчивости на ранней стадии проектирования АЭС.

В статье исследуется устойчивость расхода теплоносителя двухконтурного варианта ВВЭР СКД с паровым теплоносителем сверхкритических параметров (ПСКД-600) в номинальном режиме, проект которого разрабатывается в НИЦ «Курчатовский институт» [6]. Отметим, что ни нормативный метод [3], ни известные аналитические критерии оценки устойчивости расхода не учитывают эффектов нестационарного теплообмена в двухконтурной АЭС. Исследование проводится с использованием методики [7], которая позволяет учесть обратные связи, обусловленные взаимным влиянием процессов тепломассопереноса в первом и втором контурах. Методика основана на методе D-разбиения и численном расчете передаточной функции, входящей в характеристическое уравнение математической модели контура АЭС.

1. Математическая модель, методика и программный комплекс для расчета устойчивости расхода теплоносителя

АЭС включает в себя две идентичные петли циркуляции теплоносителя [6]. Упрощенная блок-схема одной петли изображена на рис. 1.

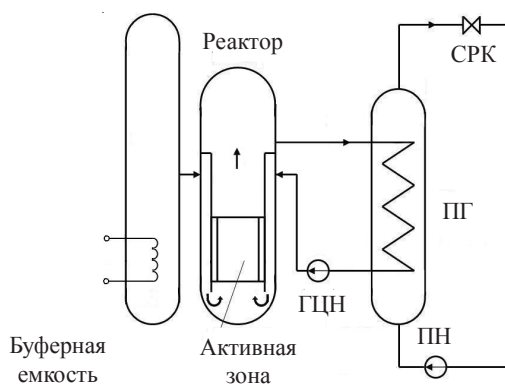


Рис. 1

В соответствии с блок-схемой с выхода парогенератора холодный теплоноситель с помощью ГЦН подается в реактор по короткому входному патрубку. Основной расход теплоносителя поступает по кольцевому каналу между шахтой и корпусом в нижнюю полость реактора. В нижней полости происходит перемешивание и разворот потоков теплоносителя и его раздача по каналам чехловых тепловыделяющих сборок (ТВС) активной зоны.

С выхода ТВС теплоноситель попадает в пространство над активной зоной, откуда через отводной патрубок – в раздающий коллектор вертикального противоточного парогенератора (ПГ) и далее по теплообменным трубкам – в сборный коллектор ПГ.

К нижней полости реактора коротким патрубком подсоединена буферная емкость, выполняющая функции стабилизации давления и расхода теплоносителя на входе реактора в номинальном режиме, а также компенсатора давления в режиме пуска реактора и гидроаккумулятора в аварии с отключением ГЦН [6]. Функционально эта емкость является аналогом компенсатора давления ВВЭР-1000.

Теплоноситель СКД второго контура питательным электронасосом (ПН) подается снизу в корпус ПГ, затем, проходя межтрубное пространство, нагревается до 480 °С и поступает на турбину.

Известно [3, 8], что механизмы теплогидравлической неустойчивости могут быть связаны как с неоднозначностью гидравлической характеристики канала (статическая или апериодическая неустойчивость), так и с запаздыванием в передаче возмущений расхода от входа канала к выходу (колебательная неустойчивость). Эти механизмы могут быть описаны в рамках одномерной гомогенной модели потока теплоносителя в форме [9]:

$$\begin{aligned} s \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial G}{\partial z} &= 0, \\ s \rho \frac{\partial i}{\partial t} + G \frac{\partial i}{\partial z} &= q + s \left(\frac{\partial P}{\partial t} + u \frac{\partial P}{\partial z} \right) + \xi G u^2, \\ \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} G u + \xi G u + s \frac{\partial P}{\partial z} + s g_z \rho &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь обозначено: t – время; z – продольная координата; s – площадь проходного сечения канала; $\rho = \rho(P, i)$, i , P , G , u – соответственно плотность, удельная энтальпия, давление, расход, скорость теплоносителя; q – тепловая мощность на единицу длины; g_z – проекция ускорения свободного падения на направление течения; $\xi = \xi_0/(2d)$ – коэффициент гидравлического сопротивления, отнесенный к гидравлическому диаметру канала. В качестве начальных условий используется решение стационарной задачи (1). Граничные условия задаются в общем виде как внешние функции:

$$i_k(0, t) = I_k(t), \quad P_k(0, t) = P_{0k}(t);$$

$$P_k(Z_k, t) = P_{Zk}(t) \quad \text{или} \quad G_k(0, t) = G_{0k}(t), \quad G_k(Z_k, t) = G_{Zk}(t),$$

где $z = 0$, $z = Z_k$ – координаты соответственно начальной и конечной точек канала, а индекс $k = 1, 2$ обозначает номер контура.

В рамках модели (1) как первый, так и второй контур циркуляции можно представить в виде обогреваемых каналов переменного сечения, теплообмен между которыми осуществляется через тонкую теплообменную поверхность теплообмен-

ных труб ПГ и может быть описан одномерным (с учетом нормального к поверхности теплообмена направления) уравнением теплопроводности.

При исследовании теплогидравлической устойчивости тепловыделение в реакторе будем считать постоянным во времени и по высоте активной зоны. На входе реактора давление поддерживается компенсатором давления $P_1(0, t) = P_1 = \text{const}$, а удельная энтальпия теплоносителя равна ее значению на выходе ПГ: $i_1(0, t) = i_1(Z_1, t)$. Давление на входе ГЦН задается как $P_1(Z_1, t) = P_1 - H^*$, где H^* – стационарный напор ГЦН (здесь и далее индекс * обозначает стационарное значение переменной).

Граничные условия для участка второго контура от питательного насоса до стопорно-регулирующего клапана турбины (СРК) определены следующим образом. Давление и удельную энтальпию теплоносителя на выходе ПН будем считать постоянными $P_2(0, t) = \text{const}$, $i_2(0, t) = \text{const}$, а давление перед СРК определяется исходя из способа регулирования расхода пара на турбину. Как известно, используются два способа регулирования турбоустановок: при постоянном ($P_2(Z_2, t) = \text{const}$) и переменном (скользящем) давлении перед СРК. В скользящем режиме для задания граничного условия перед СРК воспользуемся формулой Стодолы – Флюгеля [10]:

$$G_2(Z_2, t) = G_2^*(Z_2) \frac{P_2(Z_2, t)}{P_2^*(Z_2)} \sqrt{\frac{T_2^*(Z_2)}{T_2(Z_2, t)}}$$

T – температура теплоносителя.

В НИИ механики ННГУ для анализа устойчивости расхода теплоносителя разработана методика [7], которая основана на методе D-разбиения и численном расчете передаточной функции, входящей в характеристическое уравнение. Особенностью методики является использование нелинейной математической модели и достаточно малых (~1%) возмущений, при которых влияние нелинейностей модели при расчете переходных функций становится пренебрежимо малым. Построенные границы подтверждаются прямым численным расчетом переходных процессов. В расчетах используется программный комплекс [9, 11–13], реализующий быстродействующий алгоритм численного решения системы (1) методом скалярной прогонки.

Характеристическое уравнение для определения границ областей теплогидравлической устойчивости, согласно [7], имеет вид:

$$2\Delta P_{\text{вх}} + \Theta p + F(p) = 0, \quad (2)$$

$$F(p) = p \int_0^{\infty} e^{-pt} F_0(t) dt, \quad \Theta = \frac{G^* l}{S},$$

где $\Delta P_{\text{вх}}$ – суммарный стационарный перепад давления на подводящем трубопроводе теплоносителя; $F_0(t)$ – переходная функция, определяющая приращение суммарного перепада давления в зоне подвода тепла и на отводящем паропроводе при единичном относительном ступенчатом возмущении по расходу теплоносителя на входе зоны подвода тепла; p – параметр преобразования Лапласа; l , S – соответственно длина и сечение подводящего трубопровода.

Программный комплекс, реализующий нестационарный расчет процессов теплопереноса [9, 11–13] и численное построение D-разбиения [7], представляет собой универсальный инженерный инструмент, использование которого особенно

эффективно на ранних стадиях проектирования АЭС, поскольку он позволяет с малыми затратами оценить запас устойчивости стационарного режима АЭС по определяющим параметрам.

Исходные данные стационарного расчета циркуляционного контура ПСКД-600 приведены в таблице.

Таблица

Элемент контура	P , МПа	T , °С	G , кг/с
Буферная емкость	24,5	390	–
Активная зона, вход / выход	24,5/24,27	390/500	1974
Первый контур ПГ, вход / выход	24,15/24,0	500/390	987
ГЦН, вход / выход	24,0/24,6	390/390	987
ПН, выход	24,1	280	760
Второй контур ПГ, вход / выход	24,0/23,8	280/480	760

2. Анализ устойчивости

Активная зона ПСКД-600 состоит из чехловых ТВС, которые образуют систему параллельных каналов. Таким образом, кроме исследования общеконтурной теплогидравлической устойчивости в первом замкнутом циркуляционном контуре АЭС и во втором контуре ПГ необходимо оценить устойчивость расхода в параллельных каналах чехловых ТВС изолированной активной зоны. Этот вид неустойчивости является частным случаем колебательной неустойчивости, когда в отдельных каналах возникают колебания расхода теплоносителя со сдвигом фаз при сохранении общего расхода неизменным. Оценивая устойчивость расхода в активной зоне, необходимо учитывать, что коэффициент неравномерности тепловыделения K_q в различных ТВС изменяется в пределах $\sim 0,75-1,45$. Количество теплонапряженных ТВС с $K_q \approx 1,4$ может достигать $\sim 30\%$. Из теоретических критериев устойчивости (см., например, [4]) следует, что наихудшие условия в отношении устойчивости расхода реализуются в наиболее теплонапряженных ТВС.

На рис. 2а показаны границы областей устойчивости двух различных групп ТВС с неравномерностью тепловыделения соответственно $K_q \approx 1,0$ и $K_q \approx 1,4$ (кривые 1, 2), а также замкнутого первого контура (кривая 3), построенные по уравнению (2). Область устойчивости находится выше D-кривой, которая представляет собой границу колебательной неустойчивости. Особая прямая $\Delta P_{\text{вх}} = -F_0(t = \infty)/2 \approx -0,1$, которая является границей апериодической неустойчивости, находится в области нереализуемых параметров, что свидетельствует об отсутствии этого вида неустойчивости.

Граница области устойчивости изолированного реактора при максимальном коэффициенте неравномерности тепловыделения целиком находится в отрицательной полуплоскости, что исключает межканальную неустойчивость в активной зоне.

Граница области устойчивости расхода в замкнутом первом контуре АЭС (см. рис. 2а, кривая 3) для реализуемых значений параметра Θ также находится в отрицательной полуплоскости. Рабочая точка, соответствующая номинальному режиму ПСКД-600, на рис. 2а имеет координаты (0,25; 0,01), значение параметра $\Delta P_{\text{вх}} \approx 0,01$ МПа суммируется из перепадов давления на опускном кольцевом канале и местных сопротивлений на входе в активную зону.

Переходные процессы (см. рис. 2б), которые представляют собой отклик расхо-

да на выходе активной зоны на 5%-ное ступенчатое возмущение тепловыделения в реакторе, подтверждают отсутствие теплогидравлической неустойчивости в первом контуре ПСКД-600: кривые 1–3 рассчитаны соответственно в рабочих точках (0,25; 0) для изолированной активной зоны и (0,25; 0,01) и (0,25; 0,1) для замкнутого контура.

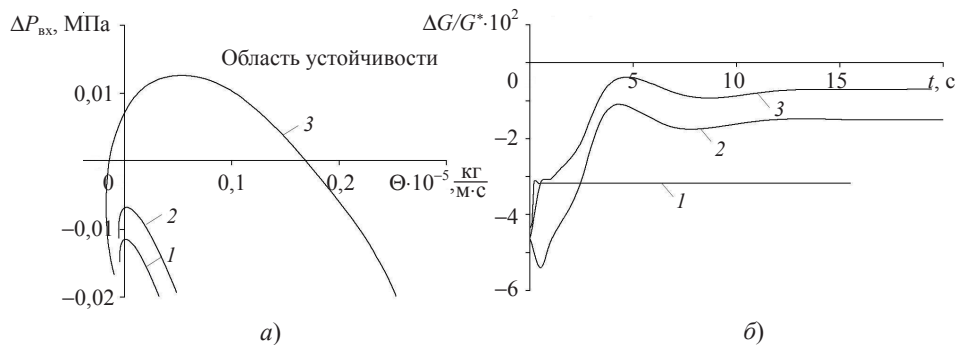


Рис. 2

Анализ устойчивости расхода теплоносителя во втором контуре ПГ проведем с учетом неопределенности перепада давления на паропроводе от парогенератора до стопорно-регулирующего клапана турбины.

На рис. 3а показаны границы области устойчивости расхода теплоносителя во втором контуре ПГ в случае постоянного давления перед СРК (кривые 1–3), соответствующие различным стационарным перепадам давления на паропроводе: $\Delta P_{\text{ПГ}} = 0,2; 0,5; 1$ МПа.

Рабочая точка (0,8; 0,1), соответствующая номинальному режиму парогенератора, во всех рассмотренных случаях находится в области устойчивости. Значение параметра $\Delta P_{\text{вх}} \approx 0,1$ МПа определяется перепадом давления на подводящем питательном трубопроводе. Области устойчивости подтверждаются переходными процессами на рис. 3б, которые получены соответственно при $\Delta P_{\text{вх}} = 0,01$ МПа и $\Delta P_{\text{ПГ}} = 0,2; 0,5; 1$ МПа, и представляют отклик расхода во втором контуре ПГ на 10%-ное ступенчатое возмущение тепловыделения в реакторе.

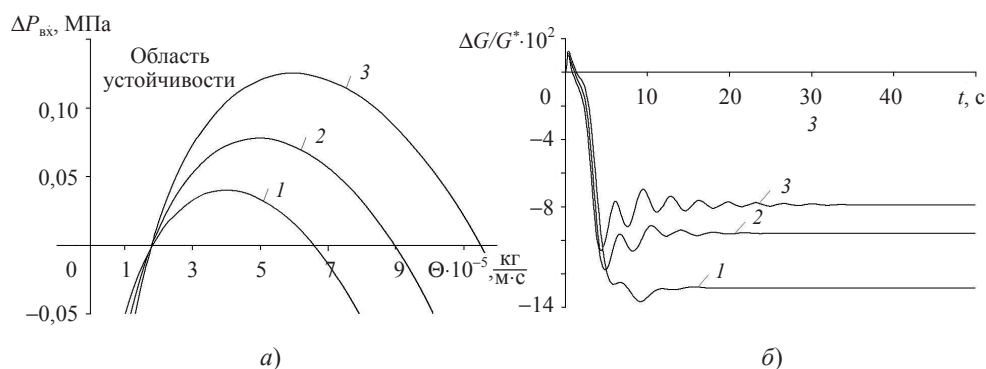


Рис. 3

В режимах работы турбины со скользящим и постоянным начальным давлением переходные функции $F_0(t)$, как очевидно, будут отличаться слагаемым

$$P_2(Z_2, t) - P_2^*(Z_2) = P_2^*(Z_2) \left(\frac{G_2(Z_2, t)}{G_2^*(Z_2)} \sqrt{\frac{T_2(Z_2, t)}{T_2^*(Z_2)}} - 1 \right),$$

которое не оказывает заметного влияния на границу области теплогидравлической устойчивости второго контура ПГ. Переходные процессы на рис. 4, представляющие собой отклик расхода на выходе второго контура ПГ на 10%-ное ступенчатое возмущение тепловыделения в реакторе при $\Delta P_{\text{вх}} = 0,1$ МПа и $\Delta P_{\text{ПП}} = 0,2-1$ МПа, подтверждают устойчивость расхода во втором контуре ПГ в скользящем режиме регулирования турбины.

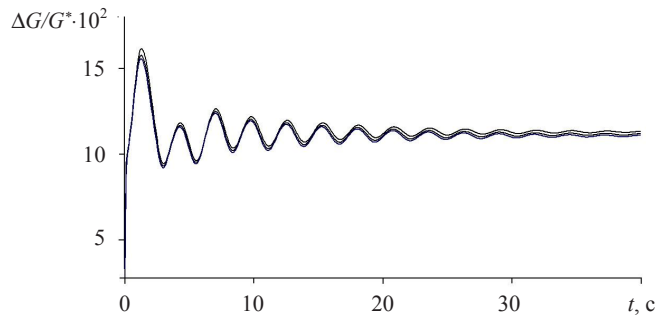


Рис. 4

Заметим, что известные аналитические критерии устойчивости получены при условии $q(t) = \text{const}$ и не дают достоверной оценки устойчивости расхода во втором контуре ПГ ввиду наличия в ПГ отрицательной обратной связи через нестационарный тепловой поток, оказывающей стабилизирующее влияние на параметры нагреваемого теплоносителя.

Чтобы оценить влияние этой обратной связи на устойчивость расхода во втором контуре ПГ, представляет интерес сравнить динамику расхода при нестационарном и стационарном тепловом потоке в ПГ. Переходные процессы на рис. 5а, аналогичные процессам на рис. 3б, но рассчитанные при $q_2(t) = \text{const}$, демонстрируют значительное ухудшение динамики расхода во втором контуре ПГ при отсутствии стабилизирующей обратной связи, обусловленной нестационарным теплообменом в ПГ. В скользящем режиме регулирования турбины при стационарном тепловом потоке в ПГ и $\Delta P_{\text{вх}} = 0,1$ МПа; $\Delta P_{\text{ПП}} = 0,01$ МПа расход во втором контуре ПГ неустойчив (рис. 5б).

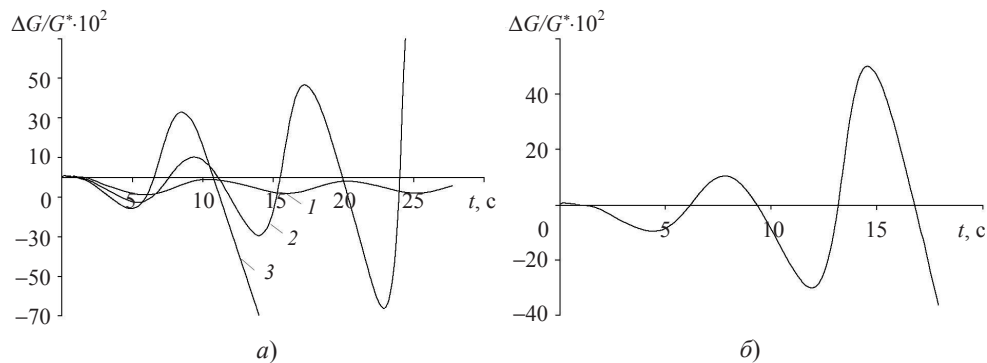


Рис. 5

Последнее указывает на трудности, которые могут возникнуть при обеспечении устойчивости расхода теплоносителя в одноконтурных ВВЭР СКД.

Выводы

Для номинального режима ПСКД-600 в плоскостях определяющих параметров выделены области общеконтурной устойчивости расхода теплоносителя в первом контуре циркуляции и во втором контуре ПГ, а также области устойчивости расхода в изолированных параллельных каналах активной зоны реактора с учетом неравномерности тепловыделения по различным группам ТВС.

Устойчивость расхода теплоносителя как в первом, так и во втором контуре в номинальном режиме ПСКД-600 обеспечена с запасом.

Устойчивость номинального режима подтверждена расчетами переходных процессов.

Авторы благодарят В.И. Будникова за обсуждение результатов.

Список литературы

1. Сидоренко В.А. Облик АЭС с легководными энергетическими реакторами следующего поколения. *Межд. форум «Атомэкспо-2010»*. Москва, 7–10 июня 2010 г.
2. Калякин С.Г., Кириллов П.Л., Баранаев Ю.Д., Глебов А.П., Богословская Г.П., Никитенко М.П., Махин В.М., Чуркин А.Н. Перспективы разработки инновационного водоохлаждаемого ядерного реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя. *Теплоэнергетика*. 2014. №8. С. 13–19.
3. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. *Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы)*. М.: Энергоатомиздат, 1990. 359 с.
4. Будников В.И., Сабаев Е.Ф. Об устойчивости естественной циркуляции в контуре с кипением теплоносителя. *Атомная энергия*. 1984. Т. 56. Вып. 2. С. 74–77.
5. Будников В.И., Савихин О.Г., Чистов А.С. Оценка устойчивости АЭС с инновационными реакторами, охлаждаемыми водой сверхкритического давления. *Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: 7-я Междунар. научно-техн. конф.* Подольск, ОКБ «Гидропресс», 17–20 мая 2011. С. 108–109.
6. Алексеев П.Н., Субботин С.А., Прошкин А.А., Чибиняева Ф.В., Седов А.А. Физико-технические особенности и экономический потенциал двухконтурной АЭС с быстрым реактором, охлаждаемым паровым теплоносителем сверхкритического давления. Докл. на конф. «Теплофизика-2008». ФЭИ, Обнинск, 2008.
7. Будников В.И., Косолапов С.В. Устойчивость кипящего канала. *Атомная энергия*. 1978. Т. 45. Вып. 3. С. 65–73.
8. Морозов И.И., Герлига В.А. *Устойчивость кипящих аппаратов*. М.: Атомиздат, 1969. 280 с.
9. Будников В.И., Савихин О.Г., Чистов А.С. Численное моделирование нестационарных теплогидравлических процессов в контурах циркуляции водяного теплоносителя перспективной АЭС. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2013. № 1 (1). С. 158–163.
10. Иванов В.А. *Режимы мощных паротурбинных установок*. Л.: Энергия, 1971. 280 с.
11. Сабаев Е.Ф., Савихин О.Г. Разностная схема для расчета динамики парогенерирующего канала со сжимаемым двухфазным теплоносителем. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика ядерных реакторов*. 1989. Вып. 2. С. 66–70.
12. Савихин О.Г., Линник С.В., Савихин А.О. Аппроксимация производных термодинамических функций для воды, пара и пароводяной смеси. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4 (3). С. 1090–1091.
13. Зефилов С.В., Кочетков А.В., Овчинников В.Ф., Савихин А.О., Смирнов Л.В., Яскеляин А.В. Численное моделирование динамического деформирования пространственного

трубопровода с жидкостью при локальном ударном нагружении. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. № 75 (2). С. 152–159.

References

1. Sidorenko V.A. Oblik AES s legkovodnymi energeticheskimi reaktorami sleduyushchego pokoleniya. *Mezhd. forum "Atomeks-2010"*. Moskva, 7–10 iyunya 2010 g.
2. Kalyakin S.G., Kirillov P.L., Baranaev Yu.D., Glebov A.P., Bogoslovskaya G.P., Nikitenko M.P., Makhin V.M., Churkin A.N. Perspektivy razrabotki innovatsionnogo vodookhlazhdaemogo yadernogo reaktora so sverkhkriticheskimi parametrami teplonositelya. *Teploenergetika*. 2014. №8. S. 13–19.
3. Kirillov P.L., Yur'yev Yu.S., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam (yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory)*. M.: Energoatomizdat, 1990. 359 s.
4. Budnikov V.I., Sabaev E.F. Ob ustoychivosti estestvennoy tsirkulyatsii v konture s kipeniem teplonositelya. *Atomnaya energiya*. 1984. T. 56. Vyp. 2. S. 74–77.
5. Budnikov V.I., Savikhin O.G., Chistov A.S. Otsenka ustoychivosti AES s innovatsionnymi reaktorami, okhlazhdaemymi vodoy sverkhkriticheskogo davleniya. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: 7-ya Mezhdunar. nauchno-tekhn. konf. Podol'sk, OKB «Gidropress», 17–20 maya 2011*. S. 108–109.
6. Alekseev P.N., Subbotin S.A., Proshkin A.A., Chibinyaeva F.V., Sedov A.A. Fiziko-tekhnicheskie osobennosti i ekonomicheskiy potentsial dvukhkturnoy AES s bystryim reaktorom, okhlazhdaemym parovym teplonositelem sverkhkriticheskogo davleniya. Dokl. na konf. "Teplofizika-2008". FEI, Obninsk, 2008.
7. Budnikov V.I., Kosolapov S.V. Ustoychivost' kipyashchego kanala. *Atomnaya energiya*. 1978. T. 45. Vyp. 3. S. 65–73.
8. Morozov I.I., Gerliga V.A. *Ustoychivost' kipyashchikh apparatov*. M.: Atomizdat, 1969. 280 s.
9. Budnikov V.I., Savikhin O.G., Chistov A.S. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnykh teplogidravlicheskiykh protsessov v konturakh tsirkulyatsii vodyanogo teplonositelya perspektivnoy AES. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013. № 1 (1). S. 158–163.
10. Ivanov V.A. *Rezhimy moshchnykh paroturbinnnykh ustanovok*. L.: Energiya, 1971. 280 s.
11. Sabaev E.F., Savikhin O.G. Raznostnaya skhema dlya rascheta dinamiki parogeneriruyushchego kanala so szhimaemym dvukhfaznym teplonositelem. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Fizika yadernykh reaktorov*. 1989. Vyp. 2. S. 66–70.
12. Savikhin O.G., Linnik S.V., Savikhin A.O. Approksimatsiya proizvodnykh termodinamicheskikh funktsiy dlya vody, para i parovodyanoy smesi. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. № 4 (3). S. 1090–1091.
13. Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Ovchinnikov V.F., Savikhin A.O., Smirnov L.V., Yaskelyain A.V. Chislennoe modelirovanie dinamicheskogo deformirovaniya prostranstvennogo truboprovoda s zhidkost'yu pri lokal'nom udarnom nagruzhenii. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2013. № 75 (2). S. 152–159.

INVESTIGATING THE STABILITY OF THE COOLANT FLOW RATE IN A TWO-CIRCUIT APP WITH THE SSP WWER REACTOR

Chistov A.S.¹, Savikhin O.G.², Ovchinnikov V.F.¹, Nikolaev M.Ya.¹

¹Research Institute of Mechanics of State University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation

²Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation

The coolant flow rate stability in a two-circuit APP with a fast breeder reactor cooled by supercritical pressure steam is numerically analyzed. The investigation is done using the D-decomposition method in the plane of the stability-determining parameters based on a one-dimensional homogeneous model of heat and mass transfer processes in the APP circulation loop. The D-decomposition

boundary is constructed using the methodology of numerical computation of the transfer function contained in the characteristic equation of the mathematical model.

The flow rate stability in the first closed circuit of the APP, in the second circuit of the steam generator and in the parallel channels of the shield fuel assemblies of the reactor core is analyzed, accounting for the variation of energy release over different fuel assembly groups. The coolant flow rate stability in the nominal regime is found to be provided with a margin.

Keywords: reactor core, coolant circulation loop, stability region, steam generator, supercritical steam pressure, flexible regulation mode of the turbine, coolant, thermal-hydraulic instability, shield fuel assembly.