

- Heated by Sodium. — Atomic Energy, 1982, v. 52, № 1, p. 24—28.
16. **Денисов В.В., Карсонов В.И., Трунов Н.Б.** Конструкция, эксплуатация и продление ресурса парогенератора энергоблока БН-600. — Там же, 2005, т. 99, вып. 6, с. 481—489. // **Denisov V.V., Karsonov V.I., Trunov N.B.** Construction, Operation, and Operating Lifetime Extension of the Steam Generators of a BN-600 Power-Generating Unit. — Ibid., 2005, v. 99, № 6, p. 917—923.
 17. **Сорокин Д.Н., Цыганок А.А., Джусов Ю.П., Митяев Н.Н.** Резистивный метод измерения локального паросодержания: Препринт ФЭИ-625, 1975.
 18. **Шейнкман А.Г.** Особенности теплогидравлики реактора, парогенераторов и натриевых контуров энергоблока БН-600. Екатеринбург, УрО РАН, 1994.
 19. **Грачев Н.С., Каретников Г.В., Кириллов П.Л. и др.** Исследование локальных и интегральных теплогидравлических характеристик трубки Фильда. — В сб.: Семинар стран — членов СЭВ «Теплофизика и гидродинамика активной зоны и парогенераторов для быстрых реакторов». 4—7 апреля 1978 г. ЧССР, Марианске-Лазне, 1978, т. 2, с. 209—218.
 20. **Кириллов П.Л., Киселев Г.В., Поплавский В.М. и др.** Исследование и опыт эксплуатации парогенераторов натрия—вода АЭС с реактором БН-350. — Теплоэнергетика, 1982, № 1, с. 7—13.
 21. **Грачев Н.С., Егорова Т.В., Кардаш Д.Ю., Турчин Н.М.** Результаты исследований теплогидравлических характеристик на однотрубной полномасштабной модели испарителя «Надежность». — В сб.: Вопросы теплофизики в элементах атомных энергетических установок при двухфазном течении теплоносителя. Обнинск, ФЭИ, 1980, т. 2, с. 50—56.
 22. **Поплавский В.М.** Быстрые реакторы. Состояние и перспективы. — Атомная энергия, 2004, т. 96, вып. 5, с. 327—335. // **Poplavskii V.M.** Fast Reactors. Status and Prospects. — Atomic Energy, 2004, v. 96, № 5, p. 301—307.
 23. **Грабежная В.А., Михеев А.С.** О теплогидравлической устойчивости парогенерирующего канала с жидкометаллическим обогревом. — В сб.: 5-я Межд. научно-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М., НИКИЭТ, 2018, с. 583—592.
 24. **Грабежная В.А., Михеев А.С.** Теплогидравлические исследования в обоснование проекта парогенератора реакторной установки на быстрых нейтронах. — В сб.: Итоги научно-технической деятельности отделения ядерно-энергетических установок за 2015 год. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2016, с. 98—111.
 25. **Грабежная В.А., Михеев А.С.** Экспериментальные исследования в обоснование парогенераторов нового поколения, обогреваемых жидкометаллическим теплоносителем. — В сб.: Теплофизика реакторов нового поколения. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2016, с. 211—222.

Поступила в Редакцию 20.05.24

УДК 621.039.526

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕПЛООБМЕНА В ВИТОМ И ПРЯМОТРУБНОМ ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ КАНАЛЕ

*Грабежная В.А., Михеев А.С., Ульянов В.В. (АО «ГНЦ РФ — ФЭИ», г. Обнинск)
e-mail: gva@ippe.ru*

В концепции четвертого поколения развития мировой ядерной энергетики (GEN IV) быстрые реакторы с жидкометаллическим охлаждением рассматриваются в качестве одного из перспективных направлений. Новые проекты АЭС с быстрыми реакторами, охлаждаемыми натрием, разрабатываются в нашей стране, Индии, Китае, Южной Корее, Франции, США, Японии, с реакторами, охлаждаемыми свинцом и его сплавами, — в нашей стране (СВБР, БРЕСТ-ОД-300), Китае (CLEAR-1), Европе (ALFRED, MYRRHA). В большинстве проектов предполагается в качестве парогенерирующих устройств использовать парогенераторы интегрального исполнения. Их экономическое преимущество очевидно — существенно снижается металлоемкость. Варианты исполнения парогенерирующих трубок, размещенных в корпу-

се парогенератора, могут быть разные: витые (бухтовая навивка), U-образные и прямые. Последний вариант в настоящее время рассматривается, например, в проектах парогенераторов быстрых реакторов нового поколения в нашей стране [1, 2] и PGSFR (Южная Корея) [3]. В этих проектах испаритель не выделяется в отдельный корпус. На вход парогенератора подается недогретая вода, на выходе образуется перегретый пар, поступающий напрямую в турбину.

При всех эксплуатационных режимах работы АЭС необходима устойчивая работа парогенератора, которая определяется множеством факторов: режимными параметрами (давлением в водяном контуре, расходом и недогревом питательной воды, тепловой мощностью, зависящей от режима работы установки — пускового,

частичных параметров, номинального) и геометрическими характеристиками — длина и диаметр парогенерирующей трубки, их число. Основными признаками, которым должен удовлетворять парогенератор, являются надежность, безопасность, эффективность, длительная работоспособность, экономичность и ремонтнопригодность. Поэтому любая конструкция требует экспериментального обоснования в части как подтверждения проектных параметров по пару, так и теплообмена парогенерирующего канала.

В 1970-х гг. в ФЭИ были проведены испытания разных по длине однетрубных моделей парогенераторов при параметрах работы БН-600 для обоснования проектных характеристик и исследования кризиса теплообмена, выноса влаги из испарителя в номинальных и иных режимах эксплуатации. Однако повышение номинальных параметров в новых проектах АЭС, переход от секционно-модульной компоновки к интегральной без выделения испарителя требуют экспериментального обоснования гидродинамической устойчивости парогенератора на протяжении всего срока эксплуатации.

В рамках реализации федеральной целевой программы «Ядерные энерготехнологии нового поколения на период 2010—2015 годы и на перспективу до 2020 года» в ГНЦ РФ — ФЭИ был выполнен комплекс экспериментальных работ по изучению теплообмена парогенерирующих каналов с обогревом натрием и свинцом.

Модель парогенератора с витыми трубками. Для проведения испытаний в обоснование парогенератора БРЕСТ-ОД-300 (вариант 2000 г.) в АО ОКБ «Гидропресс» была разработана модель с продольным течением теплоносителя, которая состояла из двух идентичных трехтрубных модулей с диаметром навивки трехтрубного пучка, равным среднему диаметру навивки теплопередающих трубок парогенератора 1600 мм. Каждый модуль состоял из опускного и подъемного витого участков, через которые прокачивали до 5% общего расхода и основной расход свинца соответственно. Экспериментальная модель хорошо термометрирована. Испытания трехтрубной секции модели проводили на свинцовом контуре стенда СПРУТ. Принципиальная программа исследований при работе одного модуля парогенератора была направлена на изучение теплообмена и в боль-

шей степени теплогидравлической устойчивости парогенерирующих трубок при параметрах частичных и пусковых режимов [4].

Модель парогенератора с прямыми трубками. Испытания однетрубной модели, разработанной также в АО ОКБ «Гидропресс», проводили на натриевом контуре стенда СПРУТ [5]. Модель парогенератора представляла собой теплообменник типа труба в трубе. Для измерения температуры стенки в зоне кризиса теплообмена в вырезах на глубине 1 мм в теплопередающей трубке установлено 30 микротермопар диаметром 0,9 мм. Всего на модели смонтировано 90 термопар. На корпусе модели установлено восемь акустических датчиков.

Особое внимание при испытаниях было обращено на кризис теплообмена и связанные с ним пульсации температуры теплопередающей стенки, а также на теплогидравлическую устойчивость парогенерирующего канала.

Конвективный теплообмен. Особых сложностей с расчетом теплоотдачи при конвекции как воды, так и пара в прямой гладкой трубке нет. Принято считать, что конвективный теплообмен в этих зонах описывается по формуле [6]

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43}. \quad (1)$$

Сложнее расчет теплообмена при конвекции в витых каналах. Жидкость, перемещаясь в витых трубках, образует вторичные течения, которые улучшают теплообмен из-за смешивания потоков. Интенсивность вторичного потока, возникшего в трубке, есть функция, зависящая от диаметра трубки и навивки (витка). Наиболее сильно эффект увеличения коэффициента теплообмена наблюдается при ламинарном течении [7]. В витых каналах вторичный поток, представляющий собой вихри, подавляет начало турбулентного режима течения, поэтому переход к турбулентному режиму затягивается, увеличивается критическое число Рейнольдса. Развитие турбулентное течение происходит при $Re = 2,2 \cdot 10^4$.

Для сравнения данных о конвективном теплообмене, полученных в экспериментах, с расчетными рекомендациями были выбраны следующие формулы:

рекомендации ЦКТИ, вошедшие в РТМ [8]:

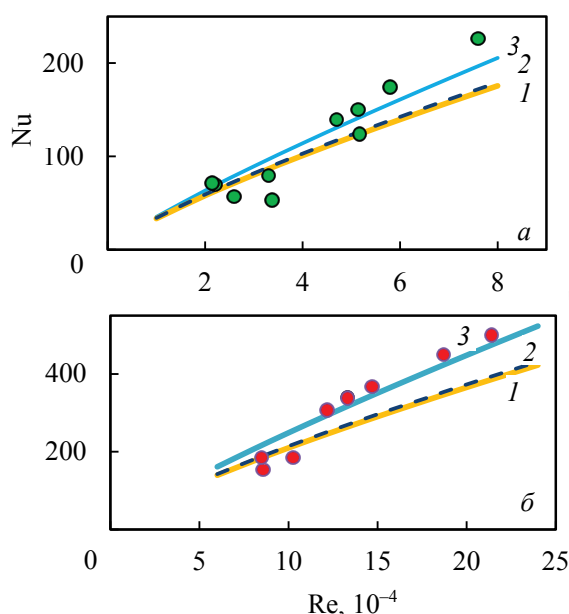
$$\frac{Nu}{Nu_{\text{прям.тр}}} = 1 + 6,3 \left(1 - \frac{d_{\text{вн}}}{D} \right) \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D} \right)^{1,5}, \quad (2)$$

формула [9]

$$Nu = 0,023 Re^{0,85} Pr^{0,4} \left(\frac{d_{\text{вн}}}{D} \right)^{0,1}, \quad (3)$$

а также формула (1). В случае витого канала рассмотрению подлежали только режимы с числом Рейнольдса выше $Re = 2,2 \cdot 10^4$. Теплообмен к свинцу рассчитывали по формулам, полученным для чистого металла. В случае грязного металла (концентрация кислорода в свинце $> 4 \cdot 10^{-5}\%$ по массе) коэффициент теплообмена существенно на 30—40% ниже по сравнению с чистым металлом [10]. Использование в расчетах формулы для чистого металла дает более низкие коэффициенты теплообмена со стороны воды (пара). На рис. 1 видно, что с ростом числа Рейнольдса расхождение между экспериментальными и расчетными данными возрастает. Наиболее близки к опытным данным расчеты по формуле (3).

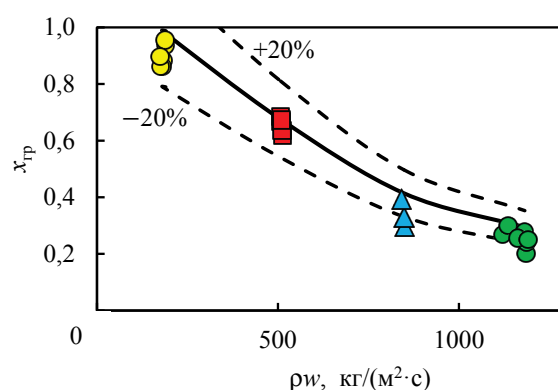
Теплообмен при конвекции воды и пара в прямой гладкой трубке рассчитывали по формуле (1). Сравнивая теплообмен при конвекции в гладком канале и витой трубке парогенератора, можно отметить, что протяженность как экономайзерной, так и пароперегревательной зоны в витой трубке будет не менее чем на 30% меньше, чем в прямой трубке при тех же режимных параметрах.



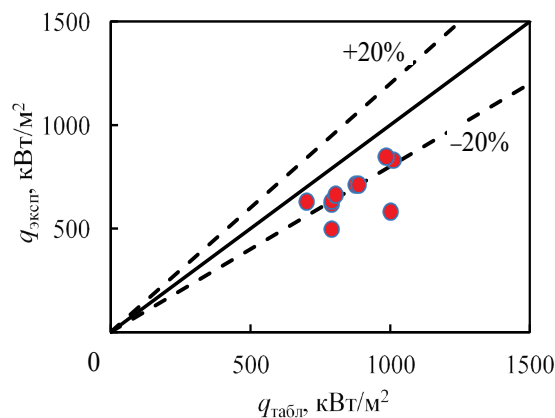
Р и с. 1. Зависимость числа Нуссельта от числа Рейнольдса при конвекции воды (а) и пара (б): 1, 2, 3 — расчет по формуле (1), (2), (3) соответственно; ●, ● — эксперимент [10]

Кризис теплообмена и пульсации температуры стенки. Прямотрубная модель парогенератора. В любом прямоточном парогенераторе с перегретым паром на выходе в парогенерирующей трубке отмечается кризис теплообмена, который характеризуется критической плотностью теплового потока и соответствующим паросодержанием — если это кризис второго рода, то граничное, если кризис первого рода, то критическое паросодержание. При давлении менее 16 МПа в парогенерирующей трубке имеет место кризис второго рода, характеризующийся высыханием пленки жидкости на теплообменной поверхности. Режим течения дисперсно-кольцевой, в рассматриваемом диапазоне изменения массовой скорости балансное паросодержание больше 0,35 [11].

В опытах наблюдали снижение как граничного паросодержания, так и критического теплового потока во всем диапазоне изменения давления и массовой скорости (рис. 2, 3 [12]). Для наблюдаемого в опыте кризиса второго



Р и с. 2. Расчетное по формуле (4) граничное паросодержание и экспериментальное при давлении 6 (●), 10 (■), 14 (▲), 17—18 МПа (●)



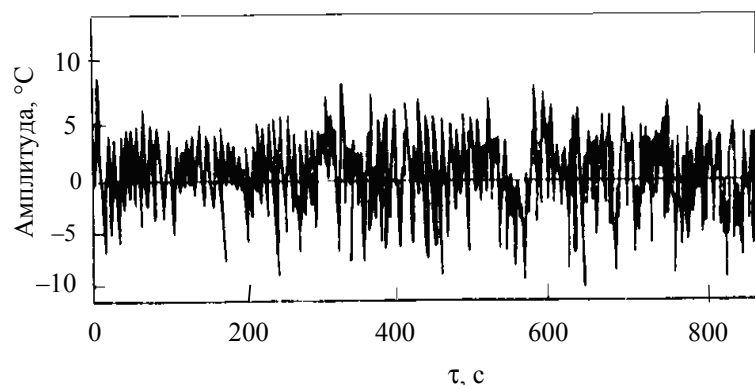
Р и с. 3. Экспериментальный критический тепловой поток (●) в сравнении с данными скелетных таблиц [11] при $P > 16$ МПа

рода был выполнен расчет граничного паросо-
держания по рекомендациям [13]:

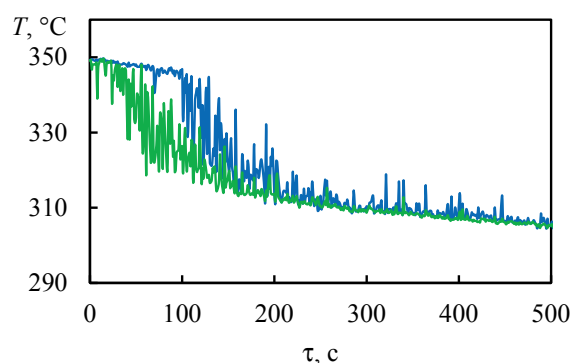
$$x_{\text{гр}} = 1 - 0,86 \exp \left[-19 \left(\frac{\rho w^2 d}{\rho' \sigma} \right)^{-0,5} \right], \quad (4)$$

где ρw — массовая скорость, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; d —
внутренний диаметр трубки, м; ρ' — плотность
воды на линии насыщения, $\text{кг}/\text{м}^3$; σ — коэффи-
циент поверхностного натяжения, Н/м.

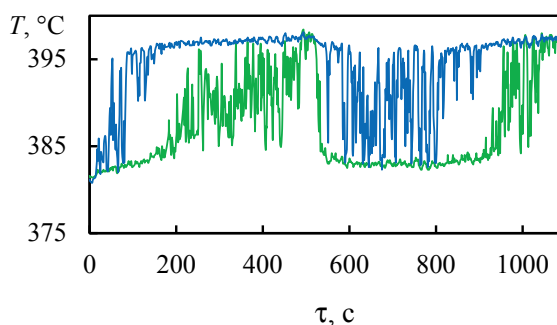
Кризис теплообмена сопровождается пуль-
сациями температуры теплопередающей стенки.
В 1970-е гг. были проведены исследования
пульсаций температуры стенки в зоне кризиса
на 5-метровой однетрубной модели парогенера-
тора на стенде СПРУТ в обоснование испарите-
ля парогенератора БН-600 [13]. Спектральный
анализ пульсаций температуры теплопередаю-
щей стенки в зоне кризиса позволил утверждать,
что полоса зарегистрированных частот ограни-
чена 2 Гц. Было установлено, что зона пульса-
ций температуры стенки во всем диапазоне ис-
следованной массовой скорости не превышает
40 мм и зависит от нее — чем выше массовая
скорость, тем эта зона меньше. Двойная ампли-
туда пульсаций температуры теплопередающей
стенки невелика (рис. 4). В опытах на том же
стенде, но на модели длиной 15 м пульсации
температуры носили нестационарный характер
[14]. На рис. 5 показана температура во времени,
измеренная двумя термопарами. Режимные па-
раметры в обоих опытах близки, двойная ам-
плитуда пульсаций температуры стенки почти
совпадает, однако, как видно на рис. 5, в случае
15-метровой парогенерирующей трубки пульса-
ции температуры стенки носят нестационарный



Р и с. 4. Фрагмент пульсаций температуры теплопередающей стенки при $P = 9,9$ МПа, $\rho w = 500$ $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ [14]



Р и с. 5. Изменение во времени температуры теплопередающей стенки в опыте 1 с расстоянием 0,13 м между термопарой T1 (—) и T10 (—)



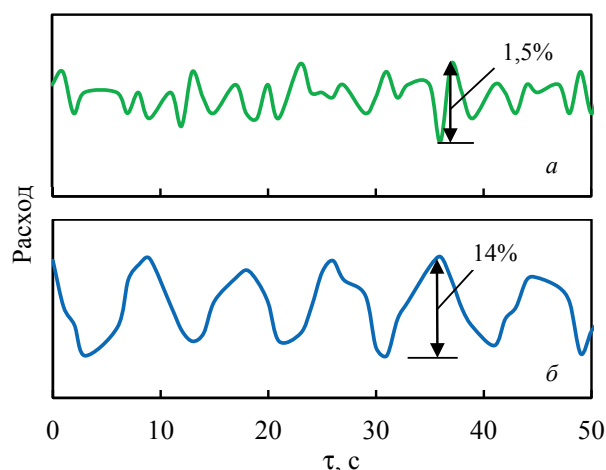
Р и с. 6. То же, что на рис. 5, в опыте 2 с расстоянием 0,22 м между термопарой T1 (—) и T21 (—)

(динамический) характер. Такой характер пульсаций прослеживался во всех режимах с кризисом кипения второго рода.

Иной характер пульсаций температуры теплопередающей стенки наблюдался в режимах с давлением 16 МПа и выше (рис. 6) [14].

Известно, что кипение сопровождается шумами. С ростом давления интенсивность шумов нарастала, в режимах с кризисом первого рода наблюдалась небольшая вибрация модели [14]. Если в режиме с кризисом второго рода в опыте 1 пульсации расхода воды были менее 1% и носили случайный характер (рис. 7, а), то в режиме с кризисом первого рода в опыте 2 они превышали 6% и носили циклический характер с частотой около 0,13 Гц (см. рис. 7, б).

Возникает вопрос: как в экспериментах на моделях с парогенерирующими трубками длиной 5 и 9 м не замечен нестационарный кризис теплообмена, а на 15-метровой парогенерирующей трубке во всех режимах с кризисом теплообмена он был? Оказалось, что это определяется режимом работы парогенерирующего канала в целом. Если парогенерирующая трубка



Р и с. 7. Фрагмент расхода воды во времени в опыте 1 (—), 2 (—) [12]

является испарителем с небольшим перегревом на выходе, протяженность зоны перегрева невелика, режимы работы устойчивые. Если теплообменная трубка работает в режиме пароперегревательного канала с протяженными закритической и пароперегревательной зонами, то возможна теплогидравлическая неустойчивость, носящая циклический характер.

Критическое паросодержание можно существенно увеличить только путем интенсификации теплообмена. Одним из эффективных методов интенсификации является внутреннее оребрение. Внутреннее оребрение в виде навивки создает закрутку потока и способствует выпадению капелек воды из ядра потока, что ведет к росту граничного паросодержания. Ранее проведенные эксперименты на 5-метровой трубке с винтовым оребрением показали, что при давлении 13,7 МПа и массовой скорости 700 кг/(м²·с) (номинальный режим работы испарителя БН-600) кризис теплоотдачи вырождается [15].

Модуль с витыми трубками. Как и в прямых трубках, в витых каналах имеет место кризис теплообмена. Если в прямых трубках тонкая пленка жидкости (кризис второго рода) почти высыхает в одном сечении, то в витых каналах кризис начинается в одной точке, затем распространяется по окружности канала на определенной длине трубки — одна часть трубки смочена пленкой жидкости, другая осушена, без пленки. В витом канале при кризисе теплообмена второго рода с возрастанием массовой скорости до определенного значения повышается граничное паросодержание в отличие от прямых трубок, где зависимость обратная [16]. На основе экспе-

риментальных данных [16] при испытаниях модели парогенератора IRIS было предложено выражение для определения первого граничного паросодержания (в верхней точке витой трубки):

$$x_{\text{гр}} = (0,44 - 0,0006P)(\rho w)^{0,114}. \quad (5)$$

Формула описывает данные в следующем диапазоне параметров: давление 2—6 МПа, массовая скорость 200—800 кг/(м²·с). При массовой скорости 300 кг/(м²·с) и менее граничное паросодержание изменялось в диапазоне от 0,91 до ~1. Анализ экспериментальных данных разных авторов с известными рекомендациями показал разброс более 100%, в результате в [17] пришли к выводу, что рекомендации хорошо описывают только собственные данные авторов рекомендаций.

Авторы настоящей статьи на основе экспериментов на одиночном модуле определили по профилю температуры теплоносителя (адиабатная стенка) граничное паросодержание в заданном диапазоне массовой скорости. Граничное паросодержание варьировалось от 0,84 до 0,98 при изменении массовой скорости в интервале 350—550 кг/(м²·с) и неизменном давлении. Рассчитанное по формуле (4) для массовой скорости воды 550 кг/(м²·с) граничное паросодержание составляет 0,68, в эксперименте — 0,84. С уменьшением массовой скорости расхождение возрастало. Однако следует отметить, что формула (4) определяет граничное паросодержание в верхней точке витой трубы, поэтому формулу можно использовать только для оценки граничного паросодержания.

Если при параметрах режима витого канала для массовой скорости воды 550 кг/(м²·с) определить граничное паросодержание в прямой трубке, то оно согласно скелетным таблицам [11] составляет 0,52, что на 38% меньше, чем в витом канале. В витом канале в области изменения массового паросодержания 0,52—0,84 имеет место развитое кипение, то время как в прямой трубке в этом диапазоне изменения паросодержания отмечается закритический теплообмен с коэффициентом теплоотдачи, который не менее чем в 10 раз ниже коэффициента теплоотдачи при развитом кипении.

Во всех режимах работы одиночного модуля не отмечено режимов с циклическим харак-

тером пульсаций расхода воды, хотя эксперименты проводили и при давлении в контуре воды выше 16 МПа.

Балластные зоны. При испытаниях прямотрубной модели парогенератора в условиях частичных параметров при давлении 10 МПа и ниже были зарегистрированы режимы, в которых как в экономайзерной, так и в закризисной зоне отмечались области с почти нулевым тепловым потоком [14]. Такой режим называют работой с балластной зоной, вид неустойчивости — тепловой неустойчивостью. При испытаниях в режимах разных нагрузок было зафиксировано перемещение зоны кризиса во времени [14]. В одном из режимов с почти нулевым тепловым потоком в экономайзерной и пароперегревательной зонах наблюдалось не только смещение зоны кризиса вверх по потоку воды на расстояние около 0,7 м, но и снижение температуры натрия и плотности теплового потока в месте кризиса. При этом максимальная амплитуда пульсаций расхода натрия в этом режиме составляла 0,8%, расхода воды — 0,5%, т.е. в режиме отмечалась только тепловая неустойчивость, обусловленная балластными зонами, гидродинамическая неустойчивость отсутствовала. Смещение зоны кризиса отмечалось только в тех режимах, где были зафиксированы балластные зоны одновременно и в экономайзерной зоне, и в зоне перегрева пара, т.е. при малом расходе воды и давлении менее 10 МПа.

В экспериментах, проводимых на трехтрубном модуле с витыми трубками, одновременное наличие балластных зон как в экономайзерной зоне, так и в зоне перегрева пара не обнаружено [18]. В витом канале при работе на частичных нагрузках при номинальных параметрах свинца и изменении расхода воды от 40 до 70% номинального большую часть пароперегревательной зоны занимала балластная область. При частичных параметрах греющего теплоносителя и расходе воды 30% и менее номинального балластная зона располагалась в области перехода от конвективного теплообмена к кипению. При испытаниях двухсекционной модели в диапазоне изменения расхода питательной воды от 4 до 125% номинального гидродинамической неустойчивости в парогенерирующих трубках не обнаружено, несмотря на наличие в некоторых режимах балластных зон.

В рассмотренных испытаниях трехтрубных модулей парогенераторов движение теплоносителей параллельное (встречное). В действительности в парогенераторе БРЕСТ-ОД-300 обтекание теплообменных трубок близко к поперечному (под небольшим углом). В ГНЦ РФ — ФЭИ были проведены испытания 18-трубной модели с витыми трубками [19]. С учетом этих результатов можно оценить преимущества того или иного способа обогрева парогенерирующих каналов, сравнив температуру пара на выходе каждой из моделей при прочих равных условиях. Были выбраны два режима, относящиеся к пусковым. При поперечном омывании парогенерирующих трубок температура перегретого пара ближе к температуре свинца на входе в модель, разница составляет 13 °С, перегрев пара — 76 °С. В случае продольного омывания разница между температурой свинца на входе в модель и температурой перегретого пара достигает 46 °С при перегреве пара всего на 28 °С. В модели с продольным обтеканием трубок большую часть теплообменной поверхности занимают зона конвекции воды и зона парообразования, при поперечном обтекании трубок — зона конвекции пара. В обоих случаях при низком расходе воды велика протяженность участков с низким теплообменом.

Заключение. Таким образом, несомненными преимуществами обладают парогенераторы с витыми трубками. Однако в настоящее время себестоимость их изготовления выше, чем прямотрубного исполнения, несмотря на то, что корпус парогенератора с витыми каналами дешевле корпуса парогенератора с прямыми трубками. Использование прямых трубок с внутренним оребрением в качестве теплообменной поверхности в определенной степени может повысить эффективность парогенераторов прямотрубного исполнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Б.А., Васяев А.В., Зверев Д.Л., Шепелев С.Ф. Состояние разработки проекта БН-1200. — В сб.: III Межд. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М.: НИКИЭТ, 2014, т. 1, с. 114—127.
2. Блохина А.Н., Лякишев С.Л., Соломатина В.А. Перспективный корпусной парогенератор для энергоблока на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. —

- Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС, 2012, № 31, с. 5—14.
3. Yoo J., Chang J., Lim J.-Y. et al. Overall system description and safety characteristics of prototype GEN IV sodium cooled fast reactor in Korea. — Nucl. Engng Techn., 2016, v. 48, p. 1059—1070.
 4. Грабежная В.А., Михеев А.С., Штейн Ю.Ю. Испытания модели парогенератора БРЕСТ на стенде СПРУТ. — В сб.: Итоги научно-технической деятельности Института ядерных реакторов и теплофизики за 2011 год. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2012, с. 227—235.
 5. Грабежная В.А., Михеев А.С. Теплогидравлические исследования в обоснование проекта парогенератора реакторной установки на быстрых нейтронах. — В сб.: Итоги научно-технической деятельности отделения ядерно-энергетических установок за 2015 год. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2016, с. 98—111.
 6. Михеев М.А. Основы теплопередачи. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.
 7. Dravid A., Smith K., Merrill E., Brian P. Effect of secondary fluid motion on laminar flow heat transfer in helically coiled tubes. — AIChE J., 1971, v. 17, № 5, p. 1114—1122.
 8. Парогенераторы АЭС прямоточные с трубами в виде винтовых змеевиков. Расчет тепловой и гидравлический. РТМ 108.300.01—81. Л., НПО ЦКТИ, 1983.
 9. Roger G., Mayhew Y. Heat transfer and pressure loss in helically coiled tubes with turbulent flow. — Intern. J. Heat Mass Transfer, 1964, v. 7, p. 1207—1216.
 10. Грабежная В.А., Парфенов А.С., Михеев А.С. О конвективном теплообмене в витых каналах с жидкометаллическим обогревом. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2016, № 5, с. 175—183.
 11. Кириллов П.Л., Бобков В.П., Жуков А.В., Юрьев Ю.С. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ. М.: ИздАт, 2010.
 12. Грабежная В.А., Михеев А.С. Экспериментальные исследования в обоснование парогенераторов нового поколения, обогреваемых жидкометаллическим теплоносителем. — В сб.: Теплофизика реакторов нового поколения. Обнинск, ГНЦ РФ — ФЭИ, 2016, с. 211—222.
 13. Кириллов П.Л., Грачев Н.С., Турчин Н.М. и др. Пульсации температуры в теплопередающей стенке модели парогенератора с обогревом натрием. — Атомная энергия, 1983, т. 54, вып. 5, с. 330—333.
 14. Грабежная В.А., Михеев А.С. О теплогидравлической устойчивости парогенерирующего канала с жидкометаллическим обогревом. — В сб.: V Межд. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М., НИКИЭТ, 2018, с. 583—592.
 15. Грачев Н.С., Кириллов П.Л., Прохорова В.А. Экспериментальное исследование теплообмена в парогенерирующей трубе с внутренним оребрением. — Теплофизика высоких температур, 1976, т. XV, № 6, с. 1234—1240.
 16. Santini L., Cioncolini A., Lombardi C., Ricotti M. Dryout occurrence in a helically coiled steam generator for nuclear power application. — EPJ Web of Conf., 2014, v. 67.
 17. Chung W., Sa Y.-C., Lee J. An experimental study on dryout pattern of two-phase flow in helically coiled tubes. — KSME Intern. J., 2002, v. 16, № 11, p. 1540—1459.
 18. Березин А.Н., Грабежная В.А., Михеев А.С., Орлов Ю.И. и др. Расчетно-экспериментальное исследование парогенератора РУ БРЕСТ-ОД-300. — В сб.: III Межд. научн.-техн. конф. «Инновационные проекты и технологии ядерной энергетики». М., НИКИЭТ, 2014, т. 1, с. 224—236.
 19. Грабежная В.А., Михеев А.С. Теплогидравлические испытания многотрубной модели парогенератора в режиме частичных параметров. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2017, вып. 3, с. 177—186.

Поступила в Редакцию 4.03.24

Р е ф е р а т ы

УДК 621.039

Троянов В.М., Гулевич А.В., Тошинский Г.И., Петроченко В.В., Комлев О.Г., Кондауров А.В. Быстрые реакторы со свинцово-висмутовым и свинцовым теплоносителями. — Атомная энергия, 2024, т. 137, вып. 5—6, с. 235—240.

Одним из путей восстановления доверия населения к ядерной энергетике после тяжелых аварий является создание реакторов с высоким уровнем внутренней самозащитности и пассивной безопасности, к которым относятся быстрые реакторы с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями: свинцово-висмутовым и свинцовым. В таких реакторах отсутствуют аккумулированные в теплоносителе потенциальная энергия сжатия и химическая энергия, которые при определенном маловероятном сочетании исходных событий могут вызвать выброс радионуклидов, требующий эвакуации населения. Из-за отсутствия многих систем безопасности в силу природных свойств АЭС с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями могут оказаться более конкурентоспособными.

Свинцово-висмутовый и свинцовый теплоносители, как и все другие, обладают своими преимуществами и недостатками. В статье представлен сравнительный анализ особенностей этих теплоносителей, их влияния на безопасность, надежность и эксплуатационные характеристики реакторов. Сделан вывод о том, что ядерные реакторы с этими теплоносителями после получения опыта эксплуатации первых образцов могут найти широкое применение в ядерной энергетике. Список лит. 10 назв.

Ключевые слова: свинцово-висмутовый теплоноситель, свинцовый теплоноситель, реактор, парогенератор, безопасность, активная зона, авария.

UDC 621.039

Trojanov V.M., Gulevich A.V. (JSC «SSC RF — IPPE», Obninsk), T o s h i n s k y G.I. (JSC «AKME-engineering», Moscow), JSC «SSC RF — IPPE», Obninsk), P e t r o c h e n k o V.V., K o m l e v O.G., K o n d a u r o v A.V. (JSC «AKME-engineering», Moscow). **Fast Reactors with Lead-Bismuth and Lead Coolants.** — Atomic Energy, 2024, v. 137, № 5—6, p. 235—240.