

ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ПАРОГЕНЕРАТОРЫ ДЛЯ АЭС С ВВЭР

М.Ю. Егоров

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
195251, Санкт-Петербург, Политехническая, 29*



Парогенераторы АЭС – важные крупногабаритные металлоемкие аппараты ядерных энергетических установок. Эффективность работы парогенераторов определяет срок эксплуатации всей установки.

Цель работы – анализ преимуществ и недостатков горизонтального и вертикального типов конструкции парогенераторов АЭС, направленный на разработку рекомендаций по созданию новых, более совершенных, парогенераторов для перспективных российских энергоблоков с реакторами типа ВВЭР повышенной мощности.

Выполнен анализ конструктивных решений и пятидесятилетнего опыта эксплуатации 400 парогенераторов как горизонтального типа, используемых в российском атомном машиностроении, так и вертикального типа, применяемых за рубежом фирмами Westinghouse (США), Combustion Engineering (США), Siemens (Германия), Mitsubishi (Япония), Doosan (Южная Корея). Выявлены достоинства и недостатки обоих типов аппаратов, определяющие условия протекания рабочего процесса. Современные АЭС с ВВЭР имеют значительные площади защитных оболочек, вызванные применением четырехпетлевой компоновки и горизонтальных парогенераторов. Установлено, что горизонтальный тип аппаратов характеризуется неустранимыми недостатками конструктивного, технологического и режимно-эксплуатационного характера: малые высота и объем парового пространства над зеркалом испарения, снижающие сепарационные возможности и мощность аппарата в целом; невозможность организации выделенного экономайзерного участка. Вследствие этого горизонтальные парогенераторы с габаритами, допустимыми для транспортировки железнодорожным, а для ВВЭР-1200 – и водным путем с диаметром корпуса до 5 м, исчерпали возможности по существенному увеличению единичной электрической мощности.

Показаны преимущества парогенераторов вертикального типа: отсутствие застойных зон во втором контуре, а следовательно, и отложений в них; равномерность тепловосприятия поверхности нагрева, обеспечивающая также улучшение условий для сепарации влаги; высокая степень осушки пароводяной смеси вследствие сочетания жалюзийных и центробежных влагоотделительных элементов; повышение температурного напора, а также увеличение параметров производимого пара на 0,3 – 0,4 МПа.

Сделан вывод о перспективности внедрения парогенераторов вертикального типа компоновки в российскую атомную энергетику. Сформулированы практические задачи, которые должны быть решены для обеспечения внедрения вертикальных парогенераторов на АЭС с реакторами ВВЭР большой мощности.

Ключевые слова: парогенератор вертикальный, парогенератор горизонтальный, водо-водяной реактор, естественная циркуляция, переменные термоциклические напряжения, экономайзерный участок, теплообмен, пароводяная смесь, температурный напор, жалюзийные и центробежные сепараторы, защитная оболочка, четырехпетлевая компоновка.

ВВЕДЕНИЕ

Парогенератор ядерной энергетической установки является одним из важнейших ее элементов. Его назначение – получение рабочего тела энергетического цикла – водяного пара. При этом в нем осуществляются сложные рабочие процессы [1, 2]:

- передача теплоты греющего теплоносителя первого контура АЭС к нагреваемой воде второго контура;
- превращение этой воды в пар;
- циркуляция пароводяной смеси;
- сепарация – отделение воды от пара.

Значительная часть аварийных остановов АЭС вызвана, в частности, неполадками в парогенераторах [3, 4].

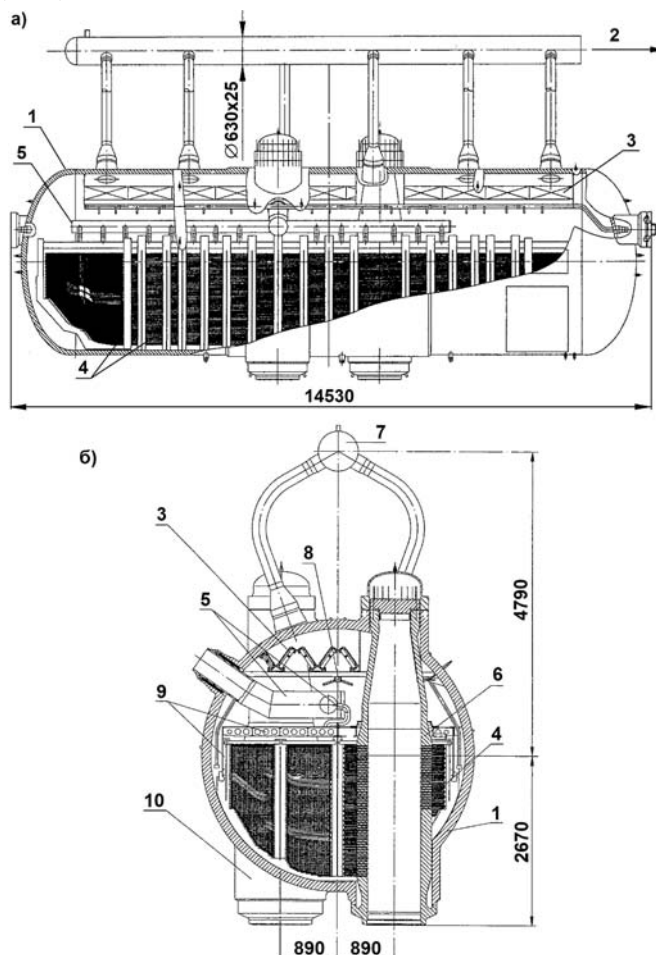


Рис. 1. Парогенератор горизонтального типа для ВВЭР-1000 (блок № 5 НВ АЭС): а) – продольный разрез, б) – поперечный разрез, 1 – корпус; 2 – выход пара; 3 – жалюзи сепарирующего устройства; 4 – теплообменный пучок; 5 – подвод питательной воды; 6 – выходной коллектор; 7 – паровой коллектор; 8 – подвод аварийной питательной воды; 9 – опора трубного пучка; 10 – входной коллектор

Парогенератор для энергоблока ВВЭР-1000 (рис. 1) является крупногабаритным аппаратом: длина корпуса 14,5 м при диаметре до 4,2 – 4,3 м. На российских АЭС с реакторами ВВЭР-1000 используется четырехпетлевая компоновка, т.е. каждый энергоблок включает в себя четыре парогенератора, занимающие значительное пространство под защитной оболочкой реакторной установки (рис. 2). Чем больше размеры защитной оболочки, тем больше ее стоимость и затраты времени на ее сооружение. Защитная оболочка должна быть достаточно прочной, т.е. выдерживать избыточное давление парагазовой смеси при аварии с разгерметизацией первого контура. Чем больше диаметр оболочки, представляющей собой сосуд под давлением, тем труднее обеспечивать ее прочность. Поэтому уменьшение диаметра защитной оболочки весьма актуально.

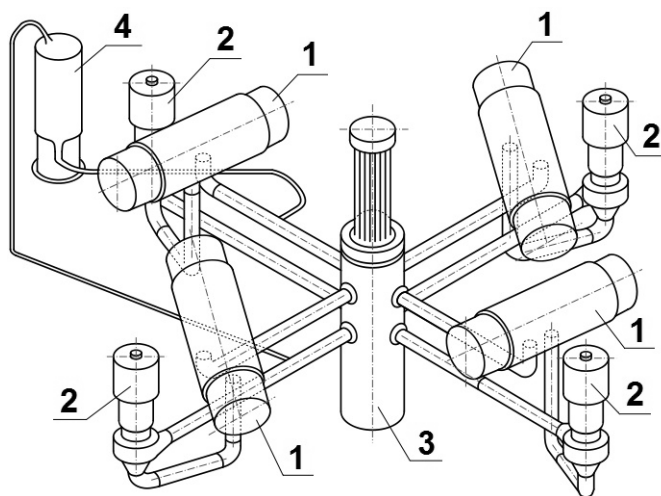


Рис. 2. Пространственная схема АЭС с ВВЭР-1000: 1 – парогенератор; 2 – циркуляционный насос; 3 – реактор; 4 – компенсатор давления

Сравнительный анализ современных проектов парогенераторов и более ранних проектов, представленных, например, в [5], показал, что за период развития «большой» атомной энергетики, начиная со времени ее появления (начало 1960-х гг.), конструктивные схемы парогенераторов практически не изменились, так как этого трудно ожидать от теплообменного аппарата поверхностного типа с передачей теплоты от одной среды к другой через стенки металлических труб – конструктивных решений, отличных от традиционных – кожухотрубчатых.

Положительная сторона такого консерватизма заключается в том, что решения, проверенные десятилетиями при развитии различных областей техники – энергетики, судостроения, химических технологий, позволяют во многих случаях получать прочные и надежные аппараты.

Отрицательная сторона такого консерватизма заключается в том, что аппараты получают зачастую избыточной массы и металлоемкости, а в отдельных случаях и недостаточно надежными, если приходится при их эксплуатации сталкиваться с неблагоприятными процессами.

Проанализируем достоинства и недостатки в конструктивных решениях и в организации рабочих процессов в парогенераторах с целью поиска возможностей для повышения единичной мощности энергоблоков ядерных энергетических установок с водо-водяными энергетическими реакторами и параметров генерируемого пара.

ПАРОГЕНЕРАТОРЫ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТИПА

На АЭС с реакторами ВВЭР с начала развития атомной энергетики используются парогенераторы горизонтального типа [6].

Достоинства конструкции

1. Относительная простота конструкции: сепарационные устройства жалюзийного типа, более простые в изготовлении, чем центробежные сепараторы.
2. Габариты, позволяющие транспортировать аппараты по железным дорогам
3. Отсутствие толстых плоских трубных досок. Коллекторы греющего теплоносителя имеют цилиндрическую форму.

Первые горизонтальные парогенераторы использовались на относительно маломощных и имевших низкие параметры пара ядерных установках технологического (неэнергетического) назначения.

С 1964 г. парогенераторы горизонтального типа стали применяться на энергоблоках Нововоронежской АЭС электрической мощностью 210, 365 и 440 МВт. Эти аппараты работали достаточно надежно.

Недостатки конструкции, выявленные в процессе эксплуатации на российских АЭС

На энергоблоках ВВЭР-440 уже в начальный период эксплуатации имели место трещины в теле коллекторов. Трещины вызывались пересечением уровня воды второго контура и более горячей стенки коллектора. При колебаниях уровня, неизбежных на АЭС, в стенке коллектора возникали переменные термоциклические напряжения. Эту проблему удалось решить путем герметизации полостей выгородок, защищающих стенку коллектора в районе колебаний уровня от прямого контакта с водой второго контура. До этого негерметичность полостей приводила к контакту относительно холодной воды с относительно горячими стенками коллекторов.

В последующий период были введены в эксплуатацию сначала на энергоблоке № 5 Нововоронежской, а затем и на других АЭС горизонтальные парогенераторы ПГ-1000. При переходе установок с ВВЭР-440 на существенно большую электрическую мощность (1000 МВт) конструкции горизонтальных парогенераторов достигли предельных теплогидравлических характеристик.

Кроме этого, габариты парогенераторов ограничены требованием перевозок по железным дорогам. Поэтому потребовалось более чем в два раза повысить удельные тепловые и паровые нагрузки, снизить фактические запасы по уровню воды второго контура и запаса этой котловой воды в корпусе на случай аварии «стоп - питательная вода». Наличие этих ограничений способствовало появлению негативных последствий: на эксплуатирующихся энергоблоках Нововоронежской, Южно-Украинской, Запорожской, Балаковской АЭС были заменены 45 аппаратов [7]. Основной причиной, вызвавшей необходимость замены парогенераторов, было появление трещин в стенках «холодных» коллекторов, собирающих из теплообменных трубок потоки греющего теплоносителя на выходе из аппарата. При колебаниях уровня воды второго контура в переходных режимах с изменениями давления и расходов среды [8], опускании уровня по вине автоматики или персонала возникали ситуации, когда трубки верхних рядов поверхности нагрева оказывались над уровнем воды, греющий теплоноситель в них не охлаждался, «холодный» коллектор на части своей поверхности становился «горячим». Этот процесс являлся нестационарным вследствие неустойчивости как положения уровня, так и процесса кипения [9 – 11] (переход от пузырькового режима к пленочному и обратно) около наружной стенки «холодного» коллектора, в связи с чем возникали переменные термические напряжения в этой части стенки.

Конструкторами горизонтальных парогенераторов ОКБ «Гидропресс» и их изготовителем – Подольским машиностроительным заводом проведена большая работа

по повышению надежности аппаратов:

- замена материала коллекторов;
- увеличение расстояния перемычек между отверстиями для трубок в коллекторах в опасной зоне;
- отмена вальцовки трубок взрывом, который может вызвать дополнительные напряжения в материале.

Модернизация конструкции горизонтальных парогенераторов привела к положительным результатам. В настоящее время поиск конструктивных решений, направленных на повышение интенсивности теплообменных процессов как в оборудовании АЭС в целом [12, 13], так и в парогенераторах АЭС [14, 15], продолжается.

Однако принципиальные недостатки концепции парогенератора горизонтального типа и прежде всего невозможность повышения единичной электрической мощности аппарата более 250 МВт сохранились. В результате в современных отечественных проектах АЭС с ВВЭР используются компоновки реакторных установок с горизонтальными парогенераторами, требующие значительных площадей под защитной оболочкой первого контура.

ПАРОГЕНЕРАТОРЫ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

Концепция конструкции парогенератора с вертикальной ориентацией корпуса в пространстве для АЭС с реактором водо-водяного типа PWR известна давно. Она реализуется на АЭС разных стран начиная с середины 1950-х гг. фирмами Westinghouse, Combustion Engineering и другими [16]. Рабочий процесс в вертикальном парогенераторе осуществляется при многократной естественной циркуляции пароводяной смеси в корпусе и в межтрубном пространстве аппарата при значительном (за счет большой высоты) движущем напоре. Это приводит к высокой скорости циркуляции пароводяной смеси и к ее высокому паросодержанию на выходе из пучка трубок греющего теплоносителя – воды первого контура АЭС. В результате появляется возможность достижения большей электрической мощности в одном аппарате, по крайней мере, равной 500 МВт.

Значительный опыт эксплуатации вертикальных парогенераторов на зарубежных АЭС продемонстрировал и их достоинства, и их недостатки. На рисунке 3 показан эскиз парогенератора фирмы Westinghouse (США),

Недостатки конструкции, выявленные в процессе эксплуатации на зарубежных АЭС

Главные недостатки конструкции парогенераторов вертикального типа проявились в виде массовых повреждений вплоть до появления сквозных трещин трубок. Повреждения происходили вследствие подшламовой коррозии в районе плоских нижних трубных досок, а также деформации, коррозии и износа в местах отложений твердых примесей в дистанционирующих пучки трубок решетках. Это привело к значительным экономическим потерям – замене на действующих АЭС около 300 аппаратов [17].

В России парогенераторы вертикального типа существуют только в проектах [18]. Это обстоятельство не позволяет достаточно полно и объективно сравнить горизонтальный и вертикальный типы аппарата из-за отсутствия собственного опыта эксплуатации вертикальных парогенераторов.

Достоинства конструкции

Вертикальные парогенераторы, которые должны создаваться с учетом опыта эксплуатации на зарубежных АЭС, в том числе негативного, имеют следующие преимущества по сравнению с горизонтальными.

1. Улучшенная компоновка под защитной оболочкой приводит к экономии материалов и объемов строительных работ. Четыре горизонтальных парогенератора, ус-

тановленные под защитной оболочкой первого контура в современных установках ВВЭР-1000, занимают большую площадь чем четыре и, тем более, чем два или три более мощных вертикальных парогенератора.

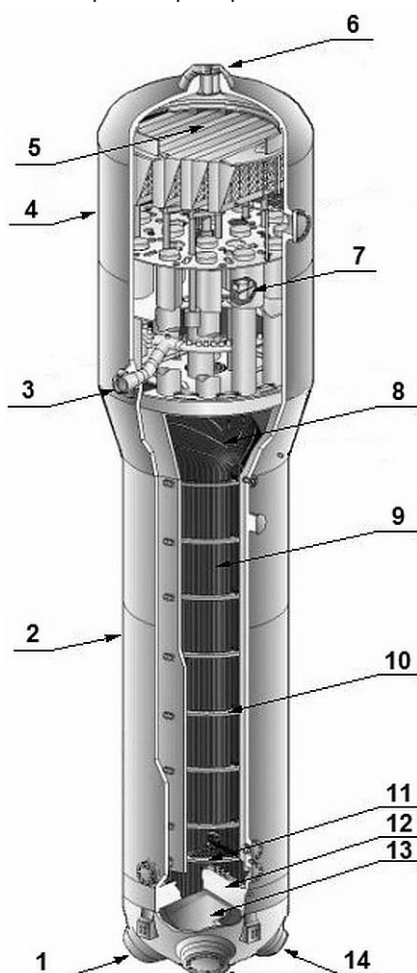


Рис. 3. Парогенератор вертикального типа фирмы Westinghouse (США): 1 – вход теплоносителя первого контура; 2 – нижняя часть корпуса; 3 – вход питательной воды; 4 – верхняя часть корпуса; 5 – вторая ступень сепарации влаги; 6 – выход пара; 7 – первая ступень сепарации влаги (циклон); 8 – антивибрационные крепления трубок; 9 – трубные пучки; 10 – дистанционирующие решетки; 11 – перегородка для распределения потока; 12 – трубная доска; 13 – разделительная перегородка; 14 – выход теплоносителя первого контура

2. Отсутствие отложения шлама в застойных зонах объемов по второму контуру. В вертикальных парогенераторах такие зоны отсутствуют, в горизонтальных они присутствуют в районе нижних рядов трубок.

3. Возможность обеспечения одинаковой длины всех трубок и постоянства проходного сечения для пароводяной смеси по поперечному сечению аппарата за счет изгиба ширм теплообменной поверхности по эвольвентной кривой приводит к равномерности тепловосприятости поверхности нагрева и улучшает условия работы сепаратора.

В нашей стране накоплен опыт изготовления ширм из трубок диаметром 16×1,5 мм из аустенитной стали X18H10T [18].

При проектировании отечественных вертикальных парогенераторов проведены экспериментальные исследования структуры двухфазного потока (локальных содер-

жений легкой фазы, скоростей фаз) на воздушно-водяной модели ширмы натуральных (по высоте) размеров; измерение теплопередачи на модели натуральных размеров; проверка герметичности узла уплотнения коллектора греющего теплоносителя; испытание крупномасштабной опытной секции модели парогенератора. Также планировались исследования полноразмерной модели парогенератора тепловой мощностью 5-10 МВт с ширмами при натуральных параметрах на Балаковской АЭС.

Необходимы дополнительные исследования теплогидравлических процессов по стороне как теплоносителя, так и рабочего тела.

4. Применение двухступенчатой (жалюзийной и центробежной) системы сепарации влаги с более высокой степенью осушки пара.

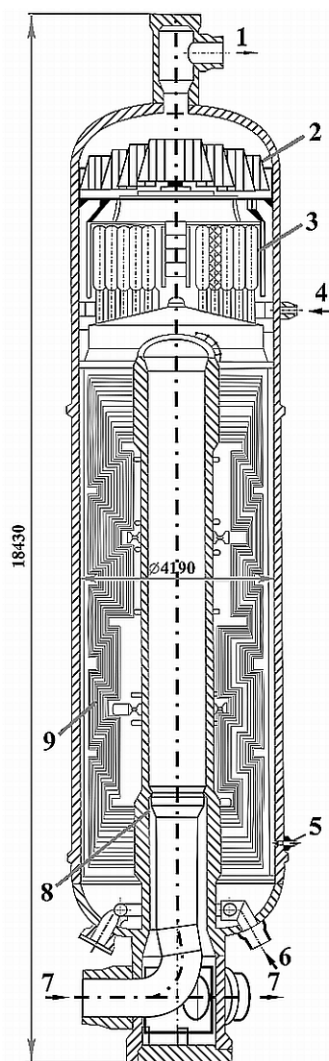


Рис. 4. Парогенератор с коллекторным креплением труб: 1 – пар; 2, 3 – сепараторы жалюзийного и циклонного типов; 4 – аварийный подвод питательной воды; 5 – штуцер непрерывной продувки; 6 – питательная вода; 7 – теплоноситель; 8 – коллектор; 9 – ширма трубного пучка

5. «Горячий» верхний и «холодный» нижний участки вертикального цилиндрического коллектора греющего теплоносителя не пересекают уровня воды второго контура. На рисунке 4 показан эскиз парогенератора с коллекторным креплением труб. Вдоль центральной оси аппарата находится коллектор, к которому прикреплен пучок теплообменных труб.

6. Конструкция вертикального парогенератора позволяет организовать в нижней части так называемый выделенный экономайзерный участок – теплообменник для подогрева питательной воды до температуры насыщения [19]. Это позволяет повысить средний температурный напор в аппарате (рис. 5). За счет этого происходит рост параметров производимого пара на 0,3 – 0,4 МПа. В горизонтальном парогенераторе организовать экономайзерный участок нельзя, так как питательная вода подается в верхнюю часть аппарата и смешивается с котловой водой, образуя пароводяную смесь, имеющую температуру насыщения.

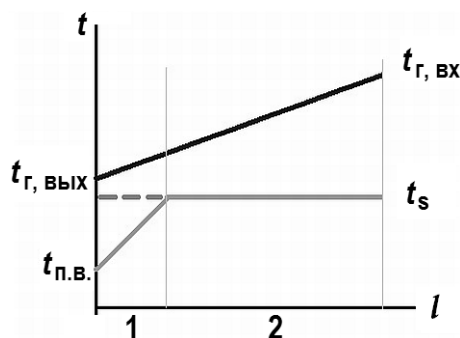


Рис. 5. Схема распределения температур греющей среды – теплоносителя (t_g) и среды второго контура – питательной воды ($t_{п.в.}$) в парогенераторе: 1 – выделенный экономайзерный участок; 2 – испарительный участок (t_s); - - - - парогенератор без выделенного экономайзерного участка

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ развития концепций горизонтальных и вертикальных парогенераторов АЭС с водо-водяными реакторами с водой под давлением ВВЭР российского исполнения и PWR зарубежного исполнения позволяет сделать следующие выводы.

1. Пятидесятилетний опыт эксплуатации сотен горизонтальных и вертикальных парогенераторов выявил как положительные, так и отрицательные стороны конструкций обоих типов парогенераторов. Оба типа парогенераторов имеют трудноустраняемые недостатки.

2. В процессе эксплуатации горизонтальных парогенераторов выявлен ряд недостатков конструктивного, технологического и режимно-эксплуатационного характера. Большинство из них было устранено при модернизации. Современным горизонтальным парогенераторам свойственны неустранимые недостатки:

- незначительные высота и объем парового пространства над зеркалом испарения, снижающие эффективность гравитационной сепарации и не позволяющие разместить центробежные сепараторы между дырчатым листом и жалюзийными сепараторами, что ограничивает мощность аппарата [20];

- сложность организации в пучке горизонтальных трубок между двумя вертикальными коллекторами выделенного экономайзерного участка, охлаждаемого «холодной» питательной водой;

- размещение горизонтальных парогенераторов внутри реакторной установки проигрывает по компактности варианту с вертикальными парогенераторами и требует более громоздкой дорогостоящей защитной оболочки.

3. Поскольку конструктивные особенности горизонтальных парогенераторов ограничивают возможности повышения единичной мощности энергоблока и параметров генерируемого пара, что отрицательно сказывается на экономичности установки, создание надежного отечественного вертикального парогенератора в ближайшее время может стать одним из приоритетных направлений дальнейшего развития атомного машиностроения.

В целях внедрения вертикальных парогенераторов в российскую атомную энергетику с реакторами ВВЭР большой мощности предлагается

– проведение испытаний крупномасштабных моделей вертикальных парогенераторов;

– в соответствии с требованиями современной нормативно-технической документации выполнить пилотный проект головного аппарата и провести его испытания в составе АЭС с ВВЭР-1200.

Координация вышеупомянутых работ может осуществляться группой специалистов проектных институтов, конструкторских и исследовательских организаций, заводоизготовителей теплообменного оборудования АЭС.

Литература

1. *Рассохин Н.Г.* Парогенераторные установки атомных электростанций. – М: Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.
2. *Федоров Л.Ф., Титов В.Ф., Рассохин Н.Г.* Парогенераторы атомных электростанций. – Л.-М.: Энергоатомиздат, 1992. – 228 с.
3. *Trunov N.B., Denisov V.V., Kharchenko S.A., Lukasevich B.I.* Consideration of field experience in developing new projects of steam generators for nuclear power stations equipped with VVER reactors. // *Thermal Engineering*. – 2006. – Vol. 53. – No. 1. – PP. 37-42.
4. *Trunov N.B., Ryzhov S.B., Davidenko S.E.* Horizontal steam generators: Problems and prospects. // *Thermal Engineering*. – 2011. – Vol. 58. – No. 3. – PP. 179-183.
5. *Лукаевич Б.И., Трунов Н.Б., Драгунов Ю.Г., Давиденко С.Е.* Парогенераторы реакторных установок ВВЭР для атомных электростанций. – М.: Академкнига, 2004. – 391 с.
6. *Дмитриев С.М., Зверев Д.Л., Бых О.А., Панов Ю.К., Сорокин Н.М., Фарафонов В.А.* Основное оборудование АЭС с корпусными реакторами на тепловых нейтронах. – М.: Машиностроение, 2013. – 415 с.
7. *Махутов Н.А., Фролов К.В., Драгунов Ю.Г., Васильченко Г.С., Гаденин М.М., Гетман А.Ф., Горбатов В.П., Дранченко Б.Н., Зацаринный В.В., Карзов Г.П., Лукаевич Б.И., Макаренко И.В., Макаренко Л.В., Михалев Ю.К., Разумовский И.А., Салин А.Н., Селезнев А.В., Фомин А.В., Шарый Н.В.* Несущая способность парогенераторов водо-водяных энергетических реакторов. – М.: Наука, 2003. – 440 с.
8. *Бажанов В.В., Вавилов А.А., Давыдов С.С., Залевский П.И., Иванов В.А.* Сравнительный анализ динамических характеристик ЯЭУ с ВВЭР-1000 и парогенераторов различных типов. // *Энергомашиностроение*. – 1988. – № 4. – С. 31-33.
9. *Синицын А.А., Карпов Д.Ф., Павлов М.В.* Теория и практика теплообмена. – Вологда: ВоГТУ, 2013. – 71 с.
10. *Кириллов П.Л., Жуков А.В., Логинов Н.И.* Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 2: Ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы. – М.: ИздАТ, 2013. – 685 с.
11. *Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А.* Тепломассообмен. – М.: МЭИ, 2011. – 562 с.
12. *Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.* Анализ методов интенсификации теплообмена в ядерных энергоустановках. / *Энергетические системы: сборник докладов II Международной научно-технической конференции*. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2017. – С. 251-257.
13. *Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.* Интенсификация теплообмена в оборудовании АЭС. / *Неделя науки СПбПУ: материалы научной конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем. Ч. 1.* – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 82-84.
14. *Гортышов Ю.Ф., Попов И.А., Олимпиев В.В., Щелчков А.В., Каськов С.И.* Теплогидравлическая эффективность перспективных способов интенсификации теплоотдачи в каналах теплообменного оборудования. *Интенсификация теплообмена*. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 531 с.
15. *Аксенов П.Л., Егоров М.Ю.* Совершенствование конструкции парогенератора АЭС с использованием кольцевых накаток-турбулизаторов. / *Энергетические системы: сборник докладов II Международной научно-технической конференции*. – Белгород: Изд-во БГТУ,

2017. – С. 258-264.

16. *Kolev N.I.* Multiphase flow dynamics 5: nuclear thermal hydraulics. – Switzerland: Springer International Publishing, 2015. – 886 p.

17. *Трунов Н.Б., Давиденко С.Е., Денисов В.В.* Надежность и ресурс трубчатки парогенераторов АЭС с ВВЭР. // ВАНТ. Серия: Обеспечение безопасности АЭС. Реакторные установки с ВВЭР. – 2005. – Вып. 9. – С. 45-54.

18. *Судаков А.В., Силин В.В., Лебедев М.Е., Фокин Б.С., Данилин Б.К., Беленький М.Я.* Перспективы создания вертикального парогенератора с ширмовой поверхностью нагрева для современных АЭС с реакторами типа ВВЭР. / Теория и практика современной науки: материалы VI Международной научно-практической конференции. – М.: Спецкнига, 2012. – С. 137-145.

19. *Агафонова Н.Д., Егоров М.Ю., Сергеев В.В., Готовский М.А., Кругликов П.А., Лебедев М.Е., Судаков А.В., Федорович Е.Д., Фокин Б.С.* Интенсификация тепломассообменных процессов в парогенераторах насыщенного пара АЭС с ВВЭР как средство повышения эффективности и надежности. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 123. – № 3. – С. 128-132.

20. *Trunov N.B., Lukasevich B.I., Veselov D.O., Dragunov Yu.G.* Steam generators – horizontal or vertical (which type should be used in nuclear power plants with VVER?). // Atomic Energy. – 2008. – Vol. 105. – No. 3. – PP. 127-135.

Поступила в редакцию 09.01.2018 г.

Автор

Егоров Михаил Юрьевич, доцент

E-mail: mikhail.yu.egorov@gmail.com

UDC 621.039

VERTICAL STEAM GENERATORS FOR VVER NPPs

Egorov M.Yu.

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University

29 Polytechnicheskaya st., St.Petersburg, 195251 Russia

ABSTRACT

Steam generators for NPPs are the important large-sized metal consuming equipment of nuclear power installations. Efficiency of steam generator operation determines the overall service life of the whole nuclear facility.

The main aim of the current study is to analyze the advantages and shortcomings of horizontal and vertical types of steam generator design. This analysis is aimed at the definition of recommendations for the development of advanced steam generators for perspective Russian units of NPPs with VVER reactors of increased power.

Design solutions and fifty-year experience of operation of 400 steam generators of horizontal type accepted in Russia and of vertical type applied by Westinghouse, Combustion Engineering, Siemens, Mitsubishi, Doosan were analyzed within the framework of this study. Advantages and drawbacks of both types of devices determining the development of conditions of the operating processes were also identified and systematized.

Currently NPPs equipped with VVER are characterized with extended surface area of containment shells due to the application of four-loop design configuration and horizontal-type steam generators. It was established that steam generator equipment of horizontal type is characterized by such inherent disadvantages of design, technological and operational character as the following: 1) small height and volume

of the vapor space above the evaporation surface reducing separation capabilities and power of the equipment as a whole; 2) impossibility of organizing separate single-phase pre-boiling section. As the result, horizontal steam generators with dimensions permissible for railroad transportation and, for VVER-1200 with vessel diameter equal to 5 m by water transport as well, have exhausted the possibilities for further significant increase of the per unit electric power.

The demonstrated advantages of vertical-type steam generators were as follows: 1) absence of stagnant zones in the second circuit, and, consequently, of hold-ups in them; 2) uniformity of heat absorption efficiency of the heating surface ensuring, as well, improved conditions for moisture separation; 3) high degree of moisture removal from steam-water mixture due to the combination of moisture separating elements of chevron and swirl-vane types; 4) increased temperature drop with parameters of generated steam elevated of by 0.3 – 0.4 MPa.

Conclusion was made on the advisability of introduction of steam generators with vertical-type layout in the Russian nuclear power generation. Practical tasks that need to be addressed in order to ensure introduction of vertical steam generators at NPPs with high-power VVER reactors were formulated.

Key words: vertical type steam generator, horizontal type steam generator, light water reactor type, natural circulation, variable thermocyclic stress, pre-boiling section, heat exchanger, steam-water mixture, temperature difference, separators of chevron and swirl-vane type, containment, the four-loop layout.

REFERENCES

1. Rassohin N.G. *Steam generation units nuclear power plants*. Moscow. Energoatomizdat Publ., 1987. 384 p. (in Russian).
2. Fedorov L.F., Titov V.F., Rassohin N.G. *The steam generators of nuclear power plants*. Saint-Petersburg – Moscow. Energoatomizdat Publ., 1992. 288 p. (in Russian).
3. Trunov N.B., Denisov V.V., Kharchenko S.A., Lukasevich B.I. Consideration of field experience in developing new projects of steam generators for nuclear power stations equipped with VVER reactors. *Thermal Engineering*. 2006, v. 53, no. 1, pp. 37-42.
4. Trunov N.B., Ryzhov S.B., Davidenko S.E. Horizontal steam generators: Problems and prospects. *Thermal Engineering*. 2011, v. 58, no. 3, pp. 179-183.
5. Lukasevich B.I., Trunov N.B., Dragunov Yu.G., Davidenko S.E. *The steam generators of WWER reactors for nuclear power plants*. Moscow. Akademkniga Publ., 2004. 391 p. (in Russian).
6. Dmitriev S.M., Zverev D.L., Byh O.A., Panov Yu.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. *Main equipment of NPP with freestanding thermal neutron reactors*. Moscow. Mashinostroenie Publ., 2013. 415 p. (in Russian).
7. Mahutov N.A., Frolov K.V., Dragunov Yu.G., Vasil'chenko G.S., Gadenin M.M., Getman A.F., Gorbatyh V.P., Dranchenko B.N., Zaccarinnyj V.V., Karzov G.P., Lukasevich B.I., Makarenko I.V., Makarenko L.V., Mihalev Yu.K., Razumovskij I.A., Salin A.N., Seleznev A.V., Fomin A.V., Sharyj N.V. *The bearing capacity of the steam generators of pressurized water reactors*. Moscow. Nauka Publ., 2003. 440 p. (in Russian).
8. Bazhanov V.V., Vavilov A.A., Davydov S.S., Zalevskij P.I., Ivanov V.A. Comparative analysis of dynamic characteristics of NPP with VVER-1000 and steam generators of various types. *Energomashinostroenie*. 1988, no. 4, pp. 31-33 (in Russian).
9. Sinicyn A.A., Karpov D.F., Pavlov M.V. *Theory and practice of heat transfer*. Vologda. Vologodskij gosudarstvennyj tehnikeskij universitet Publ., 2013. 71 p. (in Russian).
10. Kirillov P.L., Zhukov A.V., Loginov N.I. *Reference book on thermohydraulic calculations in nuclear power industry. Vol. 2: Nuclear reactors, heat exchangers, steam generators*. Moscow. Izdat Publ., 2013. 685 p. (in Russian).

11. Cvetkov F.F., Grigor'ev B.A. *Heat and mass transfer*. Moscow. Moscow Energy Institute Publ., 2011. 562 p. (in Russian).
12. Aksenov P.L., Egorov M.Ju. *Analysis of methods of intensification of heat transfer in nuclear power plants*. Energy system: Collection of reports of the II-nd International scientific-technical conference. Belgorod. Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet Publ., 2017, pp. 251-257 (in Russian).
13. Aksenov P.L., Egorov M.Yu. Intensification of heat transfer in the NPP equipment. Science week SPbSPU: Proc. of the Scient. Conf. with international participation. Institute of energy and transport systems. Part 1. Saint-Petersburg. Sankt-Peterburgskij politehnicheskij universitet Publ., 2016, pp. 82-84 (in Russian).
14. Gortyshov Yu.F., Popov I.A., Olimpiev V.V., Shhelchkov A.V., Kas'kov S.I. *Thermohydraulic efficiency of the perspective ways of intensification of heat transfer in channels heat transfer equipment*. *Intensification of heat transfer*. Kazan'. Centr innovacionnyh tehnologij Publ., 2009. 531 p. (in Russian).
15. Aksenov P.L., Egorov M.Yu. *Improving the design of the steam generator of a nuclear power plant using the ring Naka-current-turbulence*. Energy system: Collection of reports of the II-nd International scientific-technical conference. Belgorod. Belgorodskij gosudarstvennyj tehnologicheskij universitet Publ., 2017, pp. 258-264 (in Russian).
16. Kolev N.I. *Multiphase flow dynamics 5: nuclear thermal hydraulics*. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. 886 p.
17. Trunov N.B., Davidenko S.E., Denisov V.V. Reliability and resource of stills steam generators of NPP with WWER. *VANT. Ser: Obespechenie bezopasnosti AES. Reaktornye ustanovki s VVER*. 2005, v. 9, pp. 45-54 (in Russian).
18. Sudakov A.V., Silin V.V., Lebedev M.E., Fokin B.S., Danilin B.K., Belen'kij M.Ya. The prospects for the creation of a vertical steam generator with shirm heating surface for modern NPPs with VVER-type reactors. Theory and practice of modern science. Proc. of the VI-th International scientific-practical conference. Moscow, 2012, pp. 137-145 (in Russian).
19. Agafonova N.D., Egorov M.Yu., Sergeev V.V., Gotovskij M.A., Kruglikov P.A., Lebedev M.E., Sudakov A.V., Fedorovich E.D., Fokin B.S. Intensification of heat mass transfer processes in saturated steam generators of NPP with RWR as means of improving efficiency and reliability. *Atomnaya Energiya*. 2017, v. 123, no. 3, pp. 128-132 (in Russian).
20. Trunov N.B., Lukasevich B.I., Veselov D.O., Dragunov Yu.G. Steam generators – horizontal or vertical (which type should be used in nuclear power plants with VVER?). *Atomic Energy*. 2008, v. 105, no. 3, pp. 127-135.

Author

Egorov Mikhail Yur'evich, Associate Professor

E-mail: mikhail.yu.egorov@gmail.com