

УДК 621.039

## Возможность повышения мощности интегрального водоохлаждаемого реактора сверхкритического давления

В. А. Силин, В. М. Зорин, Р. А. Хлопов

### Сведения об авторах

**Силин Владимир Александрович** — кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник НИЦ «Курчатовский институт»

**Зорин Вячеслав Михайлович** — доктор технических наук, профессор кафедры Атомных электрических станций МЭИ, e-mail: zorinvm@mpei.ru

**Хлопов Роман Алексеевич** — инженер кафедры Атомных электрических станций МЭИ

Одним из шести направлений дальнейшего развития ядерной энергетики в международной программе «Generation IV» является создание реактора, охлаждаемого водой сверхкритического давления. В настоящее время в России ведутся работы по созданию подобной реакторной установки с интегральной компоновкой основного оборудования первого контура (ВВЭР-СКДИ): парогенератор размещен в корпусе реактора. Главное преимущество этого проекта состоит в повышенном уровне безопасности относительно одноконтурных и двухконтурных петлевых схем, достигаемом за счет малой протяженности радиоактивного контура, естественной циркуляции теплоносителя, поддержания критичности в ходе кампании изменением спектра нейтронов и менее тесной решетки твэлов. Наиболее существенным недостатком считается невысокая единичная мощность (670 МВт (эл.) против 1300—1800 МВт (эл.) в проектах одноконтурных реакторных установок), ограниченная максимально возможным в изготовлении размером корпуса, необходимым для размещения в нем контура естественной циркуляции.

Вопросу повышения мощности ВВЭР-СКДИ посвящена настоящая работа. Повышение тепловыделения в активной зоне без повышения максимальной температуры оболочек твэлов и при неизменных геометрических параметрах возможно только с повышением расхода теплоносителя и интенсификацией теплосъема, для чего принято вернуться к чехловым ТВС. Одновременно с этим, повышение подогревов в периферийных ТВС дросселированием расходов повышает среднюю температуру теплоносителя на выходе из активной зоны, как и температурный напор в парогенераторе. Однако увеличение расхода теплоносителя и высоты парогенератора, а также уменьшение гидравлического диаметра активной зоны ведут к росту гидравлического сопротивления контура, что при естественной циркуляции теплоносителя требует увеличения высоты контура, необходимой для достаточного движущего напора, тогда как предел уже достигнут при мощности 670 МВт (эл.).

Решение видится в переходе к принудительной циркуляции теплоносителя первого контура, так при повышении мощности до 1000 МВт (эл.) высота корпуса с установкой циркуляционных насосов на 1,7 м меньше, чем при мощности 670 МВт (эл.) с естественной циркуляцией. В случае отключения приводов насосов движущего напора достаточно для работы на естественной циркуляции со снижением мощности до 50%.

Ключевые слова: сверхкритическое давление, парогенератор, теплоноситель, теплогидравлический расчет.

---

## The possibility to increase the power capacity of an integral supercritical-pressure water-cooled reactor

V. A. Silin, V. M. Zorin, R. A. Khlopov

### Information about authors

**Silin Vladimir A.** — Ph.D. (Techn.), Leading Researcher of Research Center «Kurchatov Institute»

**Zorin Vyacheslav M.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Nuclear Power Plants Dept., MPEI, e-mail: zorinvm@mpei.ru

**Khlopov Roman A.** — Engineer of Nuclear Power Plants Dept., MPEI

Construction of a supercritical-pressure water-cooled reactor is one of the six main lines for further development of nuclear power engineering envisioned by the international program «Generation IV». Works on developing such reactor installation with an integral layout of the primary coolant circuit main equipment with the steam generator placed inside the reactor vessel (known as VVER-SKDI) are currently underway in Russia. The main advantage of this design is an enhanced level of safety as compared with single-circuit and double-circuit loop-type process arrangements, which is achieved owing to a shorter length of the radioactive circuit, natural circulation of coolant, maintaining the criticality during the campaign by adjusting the neutron spectrum, and by using a less dense lattice of fuel rods. The most essential drawback of this reactor plant is believed to be its rather moderate power capacity (670 MWe against 1300—1800 MWe

in the single-loop reactor designs), which is limited by the maximal size of the vessel (as constrained by the conditions of its manufacture) required for accommodating the natural circulation loop inside of it.

The present study addresses the problem of increasing the VVER-SKDI reactor plant's power capacity. A higher heat release density in the core while keeping the same maximal temperature of fuel rod claddings and the same geometric parameters of the core can only be achieved by increasing the coolant flow rate and enhancing heat transfer. In view of this, it was decided to adopt the previously used casing-type design of fuel assemblies (FAs). Concurrently, increasing the heating in peripheral FAs by throttling the coolant flow rate makes it possible to increase the average coolant temperature at the core outlet and the temperature difference in the steam generator. However, increasing the coolant flow rate and steam generator height, and decreasing the core hydraulic diameter entail a growth of the loop flow friction. With the adopted natural circulation of coolant, this generates the need to increase the loop height required to create the sufficient hydraulic head, whereas the limit has already been reached at the power level equal to 670 MWe.

The solution to the problem is seen in making a shift to forced circulation of the coolant. In this case, with increasing the power output to 1000 MWe, the reactor pressure vessel height with installing the reactor coolant pumps will be by 1.7 m smaller than that at the power capacity equal to 670 MWe with natural circulation. In case the pump motors are disconnected, the hydraulic head will be sufficient for the operation in the natural circulation mode with the power output reduced to 50%.

Key words: supercritical pressure, steam generator, coolant, thermal-hydraulic calculation.

Одним из направлений по созданию реактора IV поколения является переход на сверхкритическое давление (СКД) водного теплоносителя. Подавляющее большинство разрабатываемых проектов — реакторы с одноконтурной схемой охлаждения [1 — 3], главным преимуществом которых является высокая единичная мощность (1500— 1800 МВт (эл)), высокая температура пара на выходе из активной зоны (500 — 550 °С) и значение электрического КПД брутто 43 — 45%. Однако переход на СКД также создает ряд дополнительных трудностей в сравнении с одноконтурными кипящими реакторами: прямоточная схема циркуляции теплоносителя и высокая растворяющая способность воды СКД приводят к выносу большого количества активированных примесей в паротурбинную установку, а тесная решетка твэлов значительно осложняет обеспечение безопасности при авариях с течью теплоносителя. Двухконтурная петлевая схема упрощает требования к паротурбинной установке, но большая металлоемкость паропроизводящей установки повышает капитальные затраты, а тесная решетка твэлов так же затрудняет охлаждение активной зоны в аварийных режимах [4].

Проект двухконтурной интегральной реакторной установки был предложен еще в 1990 г. [5]. За счет интегральной компоновки основного оборудования первого контура, естественной циркуляции теплоносителя и спектрального регулирования мощности возможно достичь высокого уровня безопасности, а страховочный корпус позволяет заменить дорогую гермооболочку на здание, рассчитанное только на внешнее воздействие. Исходя из возможностей изготовления корпусов реакторов для СКД-параметров, мощность РУ при естественной циркуляции ограничивалась поначалу до 670 МВт (эл), а после доработки активной зоны повышена до 670 МВт (эл), тогда как при докритическом давлении мощность РУ составляет всего 200 — 300 МВт (эл) [6 — 8] из-за малого температурного напора в парогенераторе, следствием чего стала необходимость размещения в корпусе реактора больших площадей теплообмена.

Основные характеристики реактора В-670 СКДИ после оптимизации парогенератора [9] представлены

в табл. 1. Снижение температуры воды в ходе кампании увеличивает ее плотность, смягчая нейтронный спектр, что позволяет поддерживать критичность без поглотителей. Пространство внутри корпуса реактора разделено цилиндрической обечайкой (рис. 1), в нижней части которой расположена активная зона. Парогенератор занимает верхнюю часть кольцевого зазора. Нагретый в активной зоне теплоноситель поднимается внутри разделительной обечайки, поворачивает в кольцевой зазор, остывает, проходя через трубный пакет парогенератора, и опускается ко входу в активную зону. Разница между плотностью горячего теплоносителя в подъемном участке и холодного теплоносителя в опускном участке создает движущий напор, который позволяет обойтись в первом контуре только естественной циркуляцией.

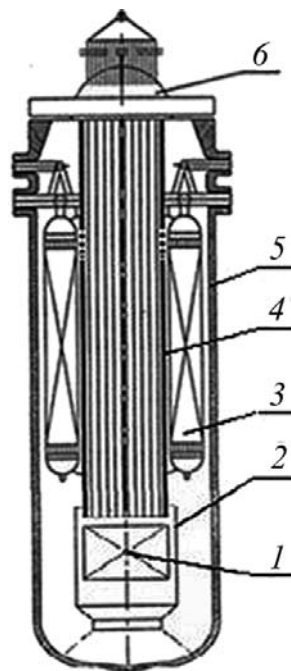


Рис. 1. Компоновка основного оборудования первого контура ВВЭР-СКДИ:

1 — активная зона; 2, 6 — шахта и крышка реактора; 3 — парогенератор; 4 — обечайка тягового участка; 5 — корпус

**Таблица 1**  
**Основные проектные характеристики РУ В-670 СКДИ [5]**

Параметр и размерность	Величина
Электрическая мощность, МВт	670
КПД, %	41
Давление теплоносителя, МПа	24
Температура теплоносителя на входе в а.з./ на выходе из нее, °С: в начале кампании к концу кампании	375/395 365/382
Давление перегретого пара, МПа	14,7
Температура перегретого пара в начале/конце кампании, °С	380/369
Коэффициент воспроизводства	0,84
Размеры корпуса реактора (внешний диаметр/ высота/ толщина), м	4,96/23,5/0,343
Диаметр активной зоны, м	2,7
Высота активной зоны, м	4,2
Число ТВС в активной зоне	163
Геометрия ТВС	шестигранник
Шаг расположения ТВС, мм	195
Число твэлов в ТВС	252
Шаг решетки твэлов в ТВС активной зоны, мм	11,73
Внешний диаметр твэла, мм	8,0
Толщина оболочки твэла, мм	0,5
Число ОР СУЗ в активной зоне	18
Средняя линейная нагрузка твэла в активной зоне, Вт/см	94,7
Максимальная линейная нагрузка твэла в активной зоне, Вт/см	159
Максимальная температура оболочки твэла, °С	485
Гидравлическое сопротивление активной зоны, кПа	18
Высота парогенератора, м	10,7
Гидравлическое сопротивление парогенератора, кПа	10,5
Высота контура естественной циркуляции от входа в активную зону до перелива в парогенератор, м	18,1
Срок службы РУ, лет	60

При выборе приоритетного типа РУ СКД для дальнейшей проработки актуален также и вопрос о потенциале улучшения, в особенности для интегрального реактора — повышения мощности.

Методика теплогидравлического расчета для оценки характеристик первого контура подробно излагалась в [9, 10]. Расчетные элементы активной зоны образованы делением на горизонтальные слои по высоте

(20 шт), каждый из которых разбит по границам ТВС. Для упрощения вычислений близкие по мощности части ТВС слоя объединены в квазикольцевые ряды, позволяющие свести задачу к двумерному виду (рис. 2). Постулируется постоянство давления на выходе из каждого слоя.

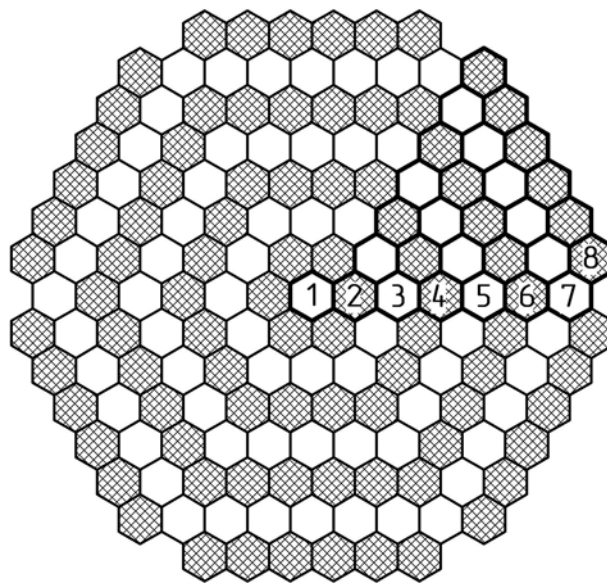


Рис. 2. Расположение горизонтальных зон и их нумерация

Теплоотдача к воде СКД рассчитана по формуле [11], наиболее близкой к результатам экспериментов на сборке:

$$Nu_{ж} = Nu_0 \left( \frac{\rho_c}{\rho_j} \right)^{0,3} \left( \frac{\bar{c}_p}{c_{pj}} \right)^n,$$

где  $n = 0,4$  при  $T_c/T_M \leq 1$  или  $T_{ж}/T_M \leq 1,2$ ;  $n = n^* + (5n^* - 2)(1 - T_{ж}/T_M)$  при  $1 \leq T_c/T_M \leq 2,5$ ;  $n^* = 0,22 + 0,18T_c/T_M$  при  $1 \leq T_c/T_M \leq 2,5$ ;  $Nu_0$  определяется по формуле Петухова [11].

Парогенератор — прямоточный прямотрубный с противоточным движением сред: рабочее тело движется внутри труб снизу вверх, теплоноситель со сверхкритическими параметрами омывает трубки снаружи. Принятая конструктивная схема парогенератора, состоящая из пяти секций, обеспечивает достаточный уровень удобства их монтажа, в том числе и при необходимости замены секции.

Для удобства разводки теплообменных труб число пар раздающих и собирающих коллекторов в каждой секции принято равным трем. Подвод питательной воды к секции и отвод пара осуществляются через центральные коллекторы секции, которые также общаются трубами с боковыми. Теплообменные трубы наружным диаметром 12 мм и толщиной стенки 1,5 мм ввальцовываются в верхние и нижние коллекторы. Между коллекторами трубы индивидуальной

разводкой равномерно заполняют свободное от вытеснителей пространство кольцевого зазора, располагаясь в шахматном порядке. Вытеснители расположены в невозможном для заполнения трубчаткой парогенератора пространстве и необходимы для предотвращения движения теплоносителя, минуя трубчатку парогенератора. Доля площади поперечного сечения кольцевого зазора, занимаемая вытеснителями составляет около 0,3%.

Коллекторы цилиндрические вертикальные с вальцовкой труб также и в полусферическое днище. Для снижения температурных напряжений конструкции и удобства монтажа или замены парогенераторных секций входные и выходные патрубки второго контура расположены выше парогенератора, а трубы подвода питательной воды проходят к раздающим коллекторам через трубный пакет.

Разбиение парогенератора на расчетные элементы проводилось только по высоте. Теплообмен между средами рассчитывался на основе коэффициентов теплоотдачи, вычисленных по формулам и методикам, рекомендованным в [12].

До настоящего времени мощность ограничивалась по максимальной температуре оболочки твэла и по гидравлическому сопротивлению контура, не превышающему движущий напор. Таким образом, повышение мощности активной зоны с сохранением максимальной температуры оболочки возможно только при интенсификации теплоотдачи. Для этого решено увеличить расход теплоносителя и вернуться к чехловой конструкции ТВС [10], потому как чехлы уменьшают проходное сечение для теплоносителя на 20%, повышая его скорость. Что еще более важно, чехлы также позволяют дросселированием корректировать расходы по группам ТВС в соответствии с их энергонапряженностью, приближая максимальные температуры оболочек в разных группах к пределу допустимости. Следовательно, средняя температура на выходе из активной зоны выравнивается. В базовом варианте В-670-СКДИ при бесчехловых ТВС и средней температуре теплоносителя на выходе из активной зоны 395 °С наибольшая выходная температура теплоносителя составляет 427 °С. Искусственное профилирование расхода позволяет как сократить подогрев в наиболее мощных центральных ТВС, так и увеличить в периферийных. Основные результаты расчета циркуляционного кон-

тура при повышении электрической мощности до 1000 МВт для различных температур на выходе из активной зоны приведены в табл. 2.

Как видно по последней строке табл. 2, создание такого реактора на естественной циркуляции невозможно по технологическим причинам, поэтому принято решение перейти к принудительной циркуляции теплоносителя. Также по результатам расчетов предпочтение стоит отдать варианту с большей температурой на выходе из активной зоны (см. табл. 2), потому как при установке циркуляционных насосов высота контура будет определяться высотой активной зоны (которая неизменна) и высотой парогенератора (нижние точки которого не должны быть ниже верхнего уровня активной зоны во избежание попадания рабочего тела в нейтронный поток), а больший температурный напор снижает требуемую высоту парогенератора. Дальнейшее повышение мощности при более низких выходных температурах, позволительное с точки зрения запаса по температуре оболочек твэлов, дополнительно увеличит высоту парогенератора из-за повышения расхода рабочего тела, что в свою очередь приведет к увеличению диаметра труб подвода питательной воды, проходящих через трубный пакет, и к сокращению числа теплообменных труб

Для дальнейшей проработки выбран вариант с температурой теплоносителя на выходе из активной зоны, равной 430 °С. Высота контура от уровня входа в активную зону до уровня входа в парогенератор в этом случае составляет 16,4 м, что на 1,7 м меньше высоты контура естественной циркуляции при мощности 670 МВт (эл). Гидравлическое сопротивление парогенератора — 15,9 кПа, полное гидравлическое сопротивление циркуляционного контура — 72,9 кПа, движущий напор — 25,1 кПа, необходимый напор насосов — 47,8 кПа. Столь малый напор может быть обеспечен насосами осевого типа, сопротивление проточной части которых при отключении приводов мало и по оценкам не превышает 0,5 кПа. По предварительным расчетам в режиме с отключенными приводами ГЦН возможна работа на естественной циркуляции на мощности не менее 500 МВт (эл), что составляет 50% от номинальной, при этом температура острого пара равна 421,6 °С. Планируемое пространство для размещения проточных частей насосов — нижняя часть

Таблица 2

#### Характеристики контура при повышенной мощности

Параметр и размерность	Значение			
Температура на выходе из активной зоны, °С	395	410	420	430
Максимальная температура оболочки твэла, °С	418	446	462	479
Гидравлическое сопротивление ТВС (max/min), кПа	80,9/28,4	64,7/22,8	59,3/20,9	55,4/19,6
Высота парогенератора, м	13,6	12,7	12,4	12,2
Необходимая для естественной циркуляции высота контура, м	45,3	35,3	32,2	30,1

кольцевого зазора под парогенератором. Подробная разработка конструктивной схемы размещения насосов на данном этапе не проводилась

Наружный диаметр корпусов реакторов, заявленный в проектах одноконтурных РУ — 6 м [1], тогда как в проекте СКДИ подтвержденные отечественным изготовителем 5 м. По оценочным расчетам мощность РУ СКДИ при увеличении внешнего диаметра корпуса до 6 м и добавления в активную зону 48 ТВС (до общего числа 211 штук) может составить 1400 МВт (эл).

Таким образом, главный «недостаток» интегральной схемы — ограниченная единичная мощность. В значительной мере он преодолевается при переходе на принудительную циркуляцию теплоносителя. Так, при неизменной максимальной температуре оболочек ТВЭЛов мощность может быть увеличена с 670 до 1000 МВт (эл), а высота корпуса снижена при этом на 1,7 м. Однако это осложняет конструкцию, повышает издержки и снижает надежность, ввиду чего на текущем этапе рано отказываться от более надежного варианта с естественной циркуляцией теплоносителя. Данная оценка повышения мощности может быть уточнена после проведения нейтронно-физических расчетов активной зоны с целью корректировки параметров для выполнения спектрального регулирования.

## Литература

1. **Buongiorno J., MacDonald P.E.** Supercritical Water Reactor (SCWR). Progress Report for the FY-03 Generation-IV. R&D Activities for the Development of the SCWR in the U.S. Report INEEL/EXT03-03-01210. Idaho (USA): National Eng. and Environmental Laboratory, 2003.
2. **Koehly C., Schulenberg T., Starfinger J.** HPLWR reactor design concept // Proc. 4<sup>th</sup> Intern. Symp. Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSWR-4). Heidelberg (Germany), 2009.
3. **Ryzhov S.B. et al.** Concept of single circuit RP with vessel type supercritical-cooled reactor // Proc. 5<sup>th</sup> Intern. Symp. Supercritical Water-Cooled Reactors (ISSWR-5). Vancouver, British Columbia (Canada), 2011.
4. **Силин В.А. и др.** Проблемы перехода на сверхкритические параметры теплоносителя в ядерной энергетике // Атомная энергия. 2014. Т. 117. Вып. 5. С. 254 — 261.
5. **Силин В.А.** Двухконтурный вариант ВВЭР-СКДИ с одноходовой активной зоной со спектральным регулированием // Росэнергоатом. 2009. № 9. С. 10 — 13.
6. **Turk R., Watzie R.** The minimum attention plant inherent safety through LWR simplification // ASME Winter Annual Meeting. Anaheim, California (USA), 1986. P. 271 — 279.
7. **Gibson I.H., Hayns M.R., Rogers J.M.** Acceptance and licensing of advanced reactor innovations // Proc. Inter. Conf. on Design and Safety of Advanced Power Plants. Tokyo (Japan), 1992. P. 4.3 — 1–6.
8. **Small Modular Reactor by Westinghouse** [Электрон. ресурс]: <http://westinghousenuclear.com/New-Plants/Small-Modular-Reactor> (дата обращения: 01.06.2016).
9. **Силин В.А., Митькин В.В., Зорин В. М., Хлопов Р.А.** Расчетное исследование контура естественной циркуляции ВВЭР-СКДИ // Вестник МЭИ. 2014. № 4. С. 28 — 34.
10. **Силин В.А., Зорин В. М., Хлопов Р.А.** Улучшение характеристик циркуляционного контура ВВЭР-СКДИ // Электрические станции. 2016. № 5. С. 10 — 14.
11. **Краснощеков Е.А., Протопопов В.С.** Экспериментальное исследование теплообмена двуокиси углерода в сверхкритической области при больших температурных напорах // Теплофизика высоких температур. 1966. Т. 4. № 3. С. 389 — 398.
12. **РТМ 1604,062–90.** Рекомендации, правила, методика расчета гидродинамических и тепловых характеристик элементов и оборудования энергетических установок.

*Статья поступила в редакцию 16.06.2016*