

УДК 621.039.5

Д.А. Соколов, инженер,  
В.В. Ким, инженер,  
В.И. Кузнецов, инженер,  
Южно-Украинская АЭС

## ПОВЫШЕНИЕ МОЩНОСТИ ВВЭР-1000

*Д.О. Соколов, В.В. Кім, В.І. Кузнецов. Підвищення потужності ВВЕР-1000.* Розглядаються питання підвищення потужності ВВЕР-1000. Показано, що підвищення теплової потужності ядерного реактора (ЯР) до 3030 МВт можливо за рахунок підвищення точності вимірювання теплової потужності ЯР, а також за рахунок підвищення точності регулювання нейтронної потужності ЯР.

*D.A. Sokolov, V.V. Kim, V.I. Kuznetsov. Increase of the WVER-1000 capacity.* The questions of the WVER-1000 capacity increase are considered. It has been shown that the increase of the WVER-1000 heat capacity up to 3030 MW is possible due to the reactor heat capacity measurement accuracy increase as well as the reactor neutron capacity regulation accuracy increase.

Главным приоритетом направлением деятельности НАЭК “Энергоатом” являются работы, направленные на обеспечение безопасности и надежности АЭС. При этом отыскание и реализация резервов увеличения выработки электроэнергии энергоблоков АЭС является актуальной задачей, ее положительное решение принесет значительные экономические выгоды, которые в первую очередь будут направляться на повышение безопасности и надежности АЭС.

Известно, что таким резервом в увеличении выработки электроэнергии является повышение КИУМ.

Другим резервом увеличения выработки электроэнергии остается повышения мощности ВВЭР-1000. Для повышения мощности реактора Южно-Украинской АЭС разработана Программа работ по повышению тепловой мощности реакторов энергоблоков №№ 1...3 ОП ЮУ АЭС до 3030 МВт [1].

*Основные предпосылки и пути повышения мощности.* В соответствии с требованиями действующих в Украине нормативных документов в проектах энергоблоков ВВЭР показано выполнение критериев надежности охлаждения ТВЭЛов и ТВЭГов в активной зоне реакторов и критериев надежности основных систем реакторной установки (РУ) для режимов с нормальными условиями эксплуатации (НУЭ), режимов с нарушением нормальных условий эксплуатации (ННУЭ) и режимов проектных аварий (ПА).

При выполнении расчетных обоснований для подтверждения указанных критериев учитываются:

- погрешности измерения и поддержания параметров РУ;
- погрешности и допуски изготовления топлива;
- погрешности расчетных методологий для нейтронно-физического и теплогидравлического анализов;
- погрешности корреляционной зависимости, используемой для определения коэффициента запаса до кризиса теплоотдачи.

В настоящее время в проектах энергоблоков ВВЭР-1000 практически все указанные неопределенности приняты консервативно и просуммированы в инженерных коэффициентах запаса.

В связи с приобретением значительного опыта эксплуатации ядерного топлива и РУ ВВЭР-1000, усовершенствованием расчетных методик и кодов, а также для более эффективно использования ядерного топлива, в рамках внедрения новых конструкций ТВС (ТВСА, ТВС-2 производства ОАО “ТВЭЛ”, ТВС-W производства “Вестингауз”, и др.) ведутся работы по уточнению начальных условий, применяемых при анализе безопасности, отличных от заложенных в 70-е годы прошлого столетия для ВВЭР.

Этот подход основан на учете погрешностей измерения теплофизических параметров РУ, статистическом учете погрешностей измерения энерговыделения в активной зоне, учете допусков на изготовление ТВС, а также на учете погрешностей расчетных методик для подтверждения отсутствия кризиса теплоотдачи во время НУЭ и ННУЭ.

Например, новая проектная документация на ТВС-А уже частично содержит элементы учета реально измеренных параметров РУ вместо консервативных. Так, уменьшены значения  $K_{\text{инж}}$ , а в некоторых расчетах НУЭ и ННУЭ расход через реактор берется не минимальным, а по результатам измерений во время эксплуатации.

Однако, из всех приведенных погрешностей погрешности измерения и поддержания параметров, которые заложены в исходное состояние РУ при анализе режимов НУЭ, ННУЭ и ПА, составляют:

- возможное отклонение тепловой мощности реактора от номинальной (с учетом точности измерения и регулирования) +4 %;
- аппаратная погрешность СВРК, связанная с восстановлением макрополя энерговыделения (измерения  $K_v$ ), +5 %;
- возможное отклонение давления в I контуре от номинального (с учетом точности измерения и поддержания) +3 кгс/см<sup>2</sup>;
- возможное отклонение температуры теплоносителя на входе в активную зону +2 °С;
- уменьшение расхода через реактор вследствие возможных отклонений характеристик ГЦН и снижения частоты сети в системе электропитания ГЦН (49 Гц) до 80000 м<sup>3</sup>/ч.

Расход теплоносителя рассчитывался с учетом протечек теплоносителя, не участвующих в охлаждении активной зоны (3 %), и уменьшения расхода через наиболее напряженную ТВС по сравнению со средним расходом через ТВС (3 %) за счет повышения подогрева теплоносителя и неравномерности распределения расхода во входной камере реактора; значения инженерных коэффициентов запаса на линейную нагрузку твэлов и твэгов и подогрев теплоносителя (при номинальных зазорах между ТВС)  $K_{\text{инж}}=1,12\dots 1,16$ .

*Возможности повышения тепловой мощности реактора за счет заложенных в нее коэффициентов запаса.*

1. Возможности по уменьшению погрешностей измерения и регулирования (поддержания) мощности реактора.

При рассмотрении режимов НУЭ, ННУЭ и ПА за исходную тепловую мощность принята величина 3120 МВт (104 %  $N_{\text{ном}}$ ). Значение проектного отклонения тепловой мощности от номинального, равное +120 МВт, складывается из предельных проектных погрешностей ее определения +60 МВт и поддержания +60 МВт.

Для некоторых реактивных ПА принята нейтронная мощность 3270 МВт (109 %  $N_{\text{ном}}$ ). В этом режиме учитывается только отклонение тепловой мощности от номинального значения, равное предельной погрешности ее определения +60 МВт.

Для повышения точности измерения и регулирования мощности в программе изложены требования необходимости замены существующих средств измерений на более высокого класса точности, а также оговорены требования по повышению точности регулирования мощности реактора [1].

Показано, что выполнение этих требований явится основой для принятия решения о повышении тепловой мощности реакторов энергоблоков №№ 1...3 ОП ЮУАЭС на 1 %  $N_{\text{ном}}$ , т.е. до 3030 МВт.

2. Возможности по уменьшению погрешности СВРК, связанной с восстановлением макрополя энерговыделения (измерения  $K_0$ ).

С целью оценки и уточнения существующих слагаемых погрешности: датчики ДПЗ, линии связи, математическая обработка и расчетная компонента НФХ, в рамках программы запланированы работы по определению погрешности восстановления поля энерговыделения.

3. Возможности по уменьшению погрешности измерения давления в первом контуре ( $P_{1к}$ ).

Применяемые на энергоблоках средства измерений (СИ) обеспечивают предельную относительную погрешность  $\delta=0,5$  % (1,15 кгс/см<sup>2</sup>), а система регулирования давления  $\pm 0,5$  кгс/см<sup>2</sup>, т.е. повышение точности измерения и поддержания  $P_{1к}$  не представляется возможным и, с точки зрения повышения мощности реактора, нецелесообразно.

4. Возможности по уменьшению погрешности измерения температуры теплоносителя на входе в активную зону и расхода теплоносителя через активную зону.

В общем случае допустимая мощность РУ определяется режимами прохождения аварийных ситуаций, когда могут возникать условия кризиса теплообмена в активной зоне реактора. Исходные значения температуры, давления и расхода теплоносителя на входе в активную зону реактора определяют этот запас до кризиса теплообмена.

В техническом обосновании безопасности энергоблоков (ТОБ) приняты:

— температура на входе в активную зону — 292,5 °С (фактическая температура с учетом погрешности определения не превышает 290 °С);

— минимальный расход теплоносителя через реактор (при работе четырех ГЦН) 80000 м<sup>3</sup>/ч. (Фактический расход теплоносителя с учетом погрешности определения не менее 83000 м<sup>3</sup>/ч).

То есть, использование при обосновании переходных режимов фактических значений температуры и расхода теплоносителя на входе в активную зону позволит снизить значения запасов на эти величины.

5. Возможности по уменьшению заложенных запасов в коэффициентах запаса на линейную нагрузку твэлов и твэгов и подогрев теплоносителя.

Запас, на основании которого рассчитываются допустимые линейные нагрузки твэлов, складывается из следующих погрешностей:

— на изготовление ТВС;

— расчета микрополя по сечению ТВС программами расчета БИПР и ПЕРМАК, входящими в КАСКАД;

— определения и поддержания мощности реактора;

— аппаратной погрешности измерения  $K_0$  в СВРК.

В рамках разработанной программы не рассматриваются возможности повышение точности изготовления ТВС и расчета микрополей по сечению ТВС.

*Выполнение требований безопасности АЭС при повышении мощности до 3030 МВт.* На основании обосновывающих материалов в Технологических регламентах безопасной эксплуатации энергоблоков ВВЭР-1000 установлена тепловая мощность реакторов:

— разрешенная 3000 МВт с учетом точности ее определения +60 МВт;

— максимально допустимая 3000+60 МВт с учетом точности поддержания +60 МВт.

Повышение точности измерения и поддержания тепловой мощности РУ на 1 % от  $N_{НОМ}$ , т.е. уменьшение ее незнания, позволит установить новые значения тепловой мощности реактора:

— разрешенная 3030 МВт с учетом точности ее определения +45 МВт;

— максимально допустимая 3030+45 МВт с учетом точности поддержания +45 МВт.

При этом консервативное значение мощности  $N_{ТОБ1}=3120$  МВт, принятое в ТОБ как исходное при рассмотрении НУЭ, ННУЭ и ПА, остается неизменным. А в связи с повышением точности измерения тепловой мощности на 0,5 %  $N_{НОМ}$ , исходное консервативное значение тепловой мощности при срабатывании АЗ “Нейтронная мощность 107 %  $N_{НОМ}$ ” будет равно не 109 %  $N_{НОМ}$ , а 108,5 %  $N_{НОМ}$ .

То есть, увеличение мощности РУ до 3030 МВт за счет повышение точности измерения и поддержания тепловой мощности РУ не изменяет принятое в ТОБ консервативное значение  $N_{ТОБ1}=3120$  МВт, а при реактивных ПА фактически снижает уставку срабатывания АЗ на 0,5 %  $N_{НОМ}$ , тем самым создает более безопасные условия для протекания переходных процессов.

Проведен анализ значений блокировок аварийной и предупредительной защит (АЗ, ПЗ) для ограничения нейтронной мощности и температуры теплоносителя в реакторе.

*Значения блокировок АЗ, ПЗ по нейтронной мощности* формируются соответственно для 107, 104, 102 % от номинального уровня мощности реактора. С повышением точности измерения тепловой мощности на 0,5 %  $N_{НОМ}$  исходное консервативное значение тепловой мощности при срабатывании АЗ “Нейтронная мощность 107 %  $N_{НОМ}$ ” будет равно не 109 %  $N_{НОМ}$ , а 108,5 %  $N_{НОМ}$ . Исходное консервативное значение тепловой мощности при срабатывании ПЗ-1 “Нейтронная мощность 104 %  $N_{НОМ}$ ” будет равно не 106 %  $N_{НОМ}$ , а 105,5 %  $N_{НОМ}$  (табл. 1).

Таблица 1

## Значения блокировки для АЗ, ПЗ по нейтронной мощности

Блокировки	Значение блокировки с учетом погрешности измерения мощности реактора, % $N_{ном}$	
	$N_p = 3000$ МВт	$N_p = 3030$ МВт
	$\Delta N_{ном} = 2 \% N_p$	$N_{ном} = 1,5 \% N_p$
АЗ	107 + 2	107 + 1,5
ПЗ-1	104 + 2	104 + 1,5
ПЗ-2	102 + 2	102 + 1,5

Значения блокировок АЗ, ПЗ по температуре теплоносителя (ТН) в горячих нитках реактора. При увеличении номинальной тепловой мощности РУ до 3030 МВт не потребуются изменять значения блокировок защит АЗ и ПЗ по температуре теплоносителя в горячих нитках реактора: ПЗ-1 —  $T_{ном} + 3$  °С, АЗ —  $T_{ном} + 8$  °С (но не более  $T_{ПЗ1} = 325$  °С,  $T_{АЗ} = 330$  °С, соответственно,  $T_{ном} \approx 319$  °С). Так как в этом случае температура в горячих нитках увеличится всего максимум на 0,4 °С ( $T_{ном}$  будет  $\approx 319,4$  °С), т.е. до  $T_{ПЗ1} = 325$  °С и  $T_{АЗ} = 330$  °С, остается значительный запас.

Таблица 2

## Значения блокировок АЗ, ПЗ по температуре теплоносителя в горячих нитках реактора

Блокировка	Значения блокировок, °С	
	При $N_p = 3000$ МВт	При $N_p = 3030$ МВт
$T_{АЗ}$	319+8 (но не более 330 °С)	319,4+8 (но не более 330 °С)
$T_{ПЗ1}$	319+3 (но не более 325 °С)	319,4+3 (но не более 325 °С)

То есть, при увеличении номинальной тепловой мощности РУ до 3030 МВт за счет повышения точности измерения и поддержания тепловой мощности реактора не потребуются изменять уставки защит АЗ и ПЗ-1 по нейтронной мощности и температуре теплоносителя в горячих нитках реактора.

*Точность измерения и регулирования (поддержания) мощности реактора.* В настоящее время тепловая мощность реактора определяется методом сведения тепловых балансов по теплотехническим параметрам первого и второго контуров.

Погрешность расчета тепловой мощности реактора складывается из систематической погрешности, вносимой измерительными комплектами (датчик — электрический тракт — ИИС или вторичный прибор), а также величины случайной ошибки измерения.

Известно, что погрешность определения тепловой мощности по параметрам первого и второго контуров в основном зависит от точности измерения температурного подогрева теплоносителя и питательной воды, а также их расхода.

Проектная предельная относительная систематическая погрешность составляет:

— по параметрам первого контура: 2,71 % (при тарировке термодатчиков) и 6,73 % (без тарировки термодатчиков);

— по параметрам второго контура: 2,0...2,5 %.

Учитывая меньшую приборную погрешность параметров второго контура и возможность оценки величины расхода питательной воды путем сравнения показаний нескольких приборов, за действительную тепловую мощность реактора принимается мощность, рассчитываемая по параметрам второго контура.

Повышение точности определения расхода теплоносителя по напорным характеристикам ГЦН не представляется возможным.

Повышение точности измерения расхода питательной воды достижимо повышением класса точности средств измерения.

В суммарной погрешности определения тепловой мощности основную долю погрешности вносит погрешность измерения расхода питательной воды (п.в.), которая вызвана:

- несоблюдением требуемых длин прямых участков трубопроводов п.в. до и после расходомерного сужающего устройства (СУпв);
- недостаточным классом точности датчиков измерения перепада давления на СУпв ( $\Delta P_{\text{СУпв}}$ );
- недостаточным классом точности датчиков измерения температуры п.в.;
- наличием блока извлечения корня (БИК) в измерительном канале:  $\Delta P_{\text{СУпв}}$  — БИК — УВС (СВРК);
- наличием в цепи размножения сигнала от датчика измерения перепада давления на СУпв до СВРК или ИВС диодной развязки.

Выполненные расчеты по определению погрешности измерения тепловой мощности реактора ВВЭР-1000 ЮУАЭС показали, что устранение дополнительных погрешностей в измерении расхода питательной воды позволит измерять тепловую мощность реактора с максимальной погрешностью 1,5 %.

В проектных обоснованиях принято, что зона нечувствительности регулятора по нейтронному потоку составляет  $\pm 2\% N_{\text{ном}}$ .

Выполненные работы по реконструкции и модернизации АРМ на энергоблоках ОП ЮУАЭС позволили повысить технические характеристики АРМ, в том числе точность регулирования. В настоящее время зоны нечувствительности регулятора АРМ-5С равны:

- по нейтронному потоку в режиме “Н”  $\pm 1,5\%$ ,
- по давлению пара в режиме “Т”  $\pm 0,5 \text{ кгс/см}^2$ ,
- по давлению пара в режиме “Н”  $\pm 1,5 \text{ кгс/см}^2$ .

Годовой экономический эффект от дополнительно отпущенной электроэнергии ЮУ АЭС при повышении мощности на  $1\% N_{\text{ном}}$  с учетом затрат на дополнительное выгорание ядерного топлива при тарифе на отпуск электроэнергии 9,51 коп/кВт·ч составит 6,8 млн грн.

С учетом изложенного можно сделать следующие выводы:

— Выполнение работ по повышению точности измерения тепловой мощности реактора до 1,5 % приведет к снижению значений блокировок срабатывания АЗ и ПЗ-1 на  $0,5\% N_{\text{ном}}$ . Тем самым создаются безопасные условия для протекания переходных процессов.

— В результате повышения точности измерения тепловой мощности до 1,5 % и поддержания значения тепловой мощности реактора не более 1,5 % будут созданы предпосылки для повышения тепловой мощности реакторов энергоблоков № 1, 2, 3 ОП ЮУАЭС не менее чем на  $1\% N_{\text{ном}}$ , т.е. до 3030 МВт.

— При увеличении номинальной тепловой мощности РУ до 3030 МВт за счет повышения точности измерения и поддержания тепловой мощности реактора не потребуется изменение значений блокировок защит АЗ и ПЗ-1 по нейтронной мощности и температуре теплоносителя в горячих нитках реактора.

— Увеличение номинальной тепловой мощности РУ до 3030 МВт за счет повышения точности измерения и поддержания тепловой мощности реактора не требует дополнительных затрат на обоснование безопасной эксплуатации РУ, поскольку не изменяется исходное консервативное значение тепловой мощности 3120 МВт ( $104\% N_{\text{ном}}$ ) при рассмотрении режимов НУЭ, ННУЭ и ПА и 3270 МВт ( $109\% N_{\text{ном}}$ ) для некоторых реактивных ПА.

## Литература

1. Программа работ по повышению тепловой мощности реакторов энергоблоков №1-3 ОП ЮУАЭС до 3030 МВт. №ПМ.0.0023.0030, ЮУАЭС, 2007г