

3. Le Dai Dien, D. N. D. (2017). Verification of VVER-1200 NPP simulator in normal operation and reactor coolant pump coast-down transient. World Journal of Engineering and Technology, 5, 507-519.

## **АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРЯМОТОЧНЫХ ПАРОГЕНЕРАТОРОВ ЭНЕРГОБЛОКА БН-800**

А.Г. Алюнин

Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группа 5061

Применение на АЭС жидкометаллических теплоносителей в настоящее время обуславливается необходимостью внедрения в ядерную энергетику реакторов на быстрых нейтронах, требующих высоких удельных теплосъемов в активной зоне.

Как показал опыт эксплуатации парогенератора (ПГ) для реакторной установки (РУ) БН-600, сталь марки 10Х2М подвергается язвенной коррозии со стороны испаряемой воды. При этом наиболее глубокие коррозионные язвы развиваются в зонах ухудшенного теплообмена и перегрева пара. Образование коррозионных язв приводит к местному утонению стенки, соответственно, к снижению прочности парогенерирующих труб. Кроме того, при температурах выше 505 - 510°C, характерных для ПГ натриевого реактора большой мощности, длительная прочность стали типа 10Х2М резко снижается. [1]

Опыт эксплуатации трубных систем и трубных досок пароперегревательных модулей парогенераторов РУ БН-600, изготовленных из стали марки 09Х18Н9 (10Х18Н9), показывает, что эта сталь обладает высокой длительной прочностью и коррозионной стойкостью в среде перегретого пара при температурах до 515°C при условии исключения заброса влажного пара из испарительных модулей. В случае таких забросов, возможных при нестационарных режимах работы РУ, металл труб и трубных досок в зоне досыхания пара может подвергаться хлоридному коррозионному растрескиванию. [1]

Проект парогенератора (Н-272) для БН-800 был разработан на базе конструкции ПГ РУ БН-600, при этом учтен опыт пуска и эксплуатации ПГ РУ БН-600. В целях сокращения поверхности, разделяющей воду и натрий, и уменьшения количества швов приварки теплообменных труб к трубным доскам исключен натриевый перегрев пара промежуточного давления, и следовательно, модули-промперегреватели (30 штук). В качестве конструкционного материала модулей-перегревателей использована сталь марки 10Х2М вместо стали марки 09Х18Н9. Для удовлетворения требований по обеспечению условий длительной прочности температура острого пара была снижена до 490 °С. Ресурс модулей парогенератора составляет 150000 часов, что потребует их замены в процессе эксплуатации.

В работе рассмотрена возможность использования более совершенных конструкционных материалов при производстве замещающих модулей, что позволит значительно увеличить их срок службы.

В качестве конструкционного материала была выбрана сталь марки 07X12НМФБ разработки ЦНИИ КМ «Прометей». Данная сталь превосходит сталь марки 10X2М по длительной прочности, имеет лучшее сопротивление обезуглероживанию в натрии, а ее технологические свойства не требуют существенных изменений в принятом технологическом процессе изготовления парогенераторов. Кроме того, скорость коррозии стали марки 07X12НМФБ в несколько раз ниже скорости коррозии стали марки 10X2М. Сталь марки 07X12НМФБ не склонна к коррозионному растрескиванию в водных средах с повышенной концентрацией хлоридов и при этом имеет лучшее по сравнению со сталью марки 10X2М сопротивление питтинговой и язвенной коррозии, что также важно для обеспечения увеличения ресурса. Основным недостатком стали марки 07X12НМФБ в сравнении со сталью марки 10X2М являются меньшие значения коэффициента теплопроводности. Сравнение сталей приведено в таблице 1. [2]

Таблица 1. Сравнение сталей

Параметры	Марка стали	
	10X2М	07X12НМФБ
Предел прочности $R_m^{500}$ , МПа	255	412
Предел текучести $R_{p0.2}^{500}$ , МПа	142	352
Предел длительной прочности $R_{m200000}^{500}$ , МПа	86	174
Назначенный ресурс модуля парогенератора, тыс. часов	150	240

На основании расчета на прочность, проведенного по методике [3] в качестве теплообменных труб для модулей испарителя и пароперегревателя были выбраны трубы толщиной 1,5 и 2,0 мм вместо 2,5 и 3,0 мм для труб из стали марки 10X2М соответственно.

Для обоснования возможности сохранения тех же габаритных размеров и существующей обвязки по методике, описанной в [4] был проведен теплогидравлический расчет, результаты которого представлены в таблице 2.

Таблица 2. Результаты теплогидравлического расчета

Параметры	Марка стали	
	10X2М	07X12НМФБ
Суммарная площадь теплообмена модуля испарителя, м <sup>2</sup>	222,8	231,8
Длина одной трубы теплопередающей поверхности модуля испарителя, м	15,1	14,6
Суммарная площадь теплообмена модуля пароперегревателя, м <sup>2</sup>	132,9	142,6
Длина одной трубы теплопередающей модуля пароперегревателя, м	13,6	13,6
Гидравлические потери по пароводяному тракту (модули испаритель и пароперегреватель), кПа	949,8	479,7

Несмотря на несколько меньшие значения коэффициента теплопроводности стали марки 07X12НМФБ по сравнению со сталью марки 10X2М за счет снижения толщины теплообменных труб значения длины теплообменных труб получилось одинаковым, кроме того, из-за уменьшения скорости рабочего тела сократились гидравлические потери по пароводяному тракту.

В работе обоснована возможность применения стали марки 07X12НМФБ при производстве замещающих модулей парогенератора для РУ БН-800, что позволит в 1,6 раз увеличить их срок службы. Такая замена является возможной, так как сохраняются длины теплообменных труб и габаритные размеры модулей, следовательно отсутствует необходимость в существенном изменении обвязки и компоновки парогенераторов.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Артемьева Д.А., Карзов Г.П., Кудрявцев А.С., Марков В.Г., Суворов С.А., Брыков С.И., Денисов В.В., Королев С.Ю., Метальников М.С. Выбор конструкционного материала для парогенератора по критериям обеспечения коррозионной стойкости в различных условиях эксплуатации натриевого реактора большой мощности // «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Обеспечение безопасности АЭС» – 2014. Вып. 34. – С. 53-59.
2. Лякишев С.Л., Денисов В.В., Лякишева М.Д., Чабан В.А., Халутин А.А., Блохина А.Н., Жаров Н.В., Усачев В.А. Расчетное обоснование парогенератора РУ БН-1200// «Вопросы атомной науки и техники». Серия «Обеспечение безопасности АЭС» – 2014. Вып. 34. – С. 113-125.
3. Нормы расчета на прочность оборудования и Н83 трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) / Госатомэнергонадзор СССР. - М.: Энергоатомиздат, 1989.— 525 с.
4. Рассохин Н.Г. Парогенераторные установки атомных электростанций: Учебник для вузов. - 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 384 с: ил.

Научный руководитель: А.В. Воробьев, к.т.н., доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.