

УДК 621.03  
DOI: 10.63430/TIA202502008

## Тепловой расчет отсека нагрева смешивающего подогревателя высокого давления на основе экспериментального исследования

Ф.А. Святкин<sup>1</sup>, В.Д. Лычаков<sup>1,2</sup>, Ю.В. Усов<sup>1</sup>, А.С. Матяш<sup>1</sup>,  
Б.Ф. Балунов<sup>1</sup>, Ю.Г. Сухоруков<sup>1</sup>, П.В. Егоров<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «НПО по исследованию и проектированию энергетического  
оборудования им. И.И. Ползунова», Санкт-Петербург

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

E-mail: LychakovVD@ckti.ru

Для детального исследования теплообмена воды и водяного пара при высоком давлении была создана и испытана полновысотная модель узла смешения потоков теплообменивающихся сред (СППВ). Результаты испытаний показали, что недогрев питательной воды до температуры насыщения на выходе из модели СППВ не превышает 1 и 2 °С при двух- и одноконтурном выполнении водораздающего узла модели соответственно. Использование капельной модели предпочтительно для теплового расчета отсека нагрева СППВ.

**Ключевые слова:** реакторная установка БРЕСТ, смешивающий подогреватель, система регенеративно-го подогрева, недогрев, капельная модель.

### Введение

В настоящее время идет разработка оборудования для АЭС с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300, работающей на быстрых нейтронах с нитридным уран-плутониевым топливом равновесного состава, с двухконтурной схемой преобразования тепла и свинцовым теплоносителем первого контура. Создаваемая установка БРЕСТ-ОД-300 основана на принципе естественной безопасности.

Выбор свинцового теплоносителя обоснован рядом преимуществ: высокой температурой кипения, радиационной стойкостью, малоактивируемостью (с быстрым спадом активности), инертностью при взаимодействии с воздухом и водой. При использовании свинцового теплоносителя не требуется высокого давления в первом контуре, исключаются аварии с потерей охлаждения.

Однако свинцовый теплоноситель накладывает на второй контур ограничение — температура питательной воды, поступающей из системы регенерации высокого давления в парогенератор, должна быть  $340 \pm 5$  °С во всех эксплуатационных режимах в связи

с опасностью затвердевания свинца.

В схему регенеративного подогрева питательной воды включен смешивающий подогреватель питательной воды (СППВ) после ПВД-8, который обеспечивает нагрев питательной воды до требуемого значения в процессе контактного теплообмена с греющей средой — паром, поступающим из парогенератора. СППВ работает при давлении 14,6 МПа и должен обеспечивать подогрев питательной воды до температуры 340 °С во всех режимах работы реакторной установки.

Интенсивность процесса контактного теплообмена воды и водяного пара хорошо изучена в области давлений не более 1,4 МПа. Разработаны соответствующие расчетные рекомендации для смешивающих подогревателей низкого давления и деаэраторов питательной воды [1, 2]. Две экспериментальные работы по контактному пароводяному теплообмену при давлении пара  $p = 15,0$  МПа и температуре воды  $T = 300 \div 340$  °С были проведены ОАО «ВТИ» в процессе контакта пара с водой, вытекающей под давлением из одиночного соплового отверстия диаметром 10 или 20 мм [3]. Еще один эксперимент на стенде высокого давления ОАО «ВТИ» проведен сотрудниками ОАО «НПО ЦКТИ» с одной безнапорной водораспределительной тарелкой.

Для получения достоверного соответствия результатов испытаний с работой СППВ в условиях реальной эксплуатации было принято решение о проведении экспериментальных исследований процесса теплообмена на полновысотной крупномасштабной модели узла смешения потоков теплообменивающихся сред при их натурных параметрах (давление, температура, скорость истечения из отверстий) в СППВ для РУ БРЕСТ-ОД-300 в различных режимах ее работы.

### Описание экспериментальной модели

При создании модели СППВ были сохранены натурные высоты узла смешения потоков теплообменивающихся сред и размеры отдельных элементов СППВ: диаметры и шаги расположения отверстий в водораспределительных тарелках. Количество отверстий в тарелках, а также расходы теплообменивающихся сред были выполнены в масштабе моделирования 1:245.

Значения высоты уровня воды над тарелками приняты таким образом ( $h_{\text{ном}} \approx 110$  мм), чтобы обеспечить натурные значения скорости воды в отверстиях тарелки ( $w_{\text{ном}} \approx 1$  м/с).

Эксперименты проводили как с одной, так и с двумя водораспределительными тарелками. В варианте с двумя тарелками дополнительно устанавливали верхнюю тарелку на расстоянии 350÷750 мм от нижней тарелки.

Чертеж модели СППВ с одной тарелкой представлен на рис. 1, с двумя тарелками — на рис. 2.

Для сохранения масштаба моделирования и снижения потерь тепла на участке смешения потоков внутри корпуса модели имеется вертикальная осесимметричная стальная выгородка 4 (см. рис. 1, 2). Она отделяет по всей высоте модели узел теплообмена от кольцевого зазора, внешне ограниченного корпусом модели. Для выравнивания давления в верхней части выгородки предусмотрено отверстие.

Греющий пар подводился по осевому трубопроводу, внизу которого расположено парораспределительное устройство 3, представляющее собой две крестообразно расположенные, заглушенные с внешних торцов трубы с отверстиями для равномерной подачи пара.

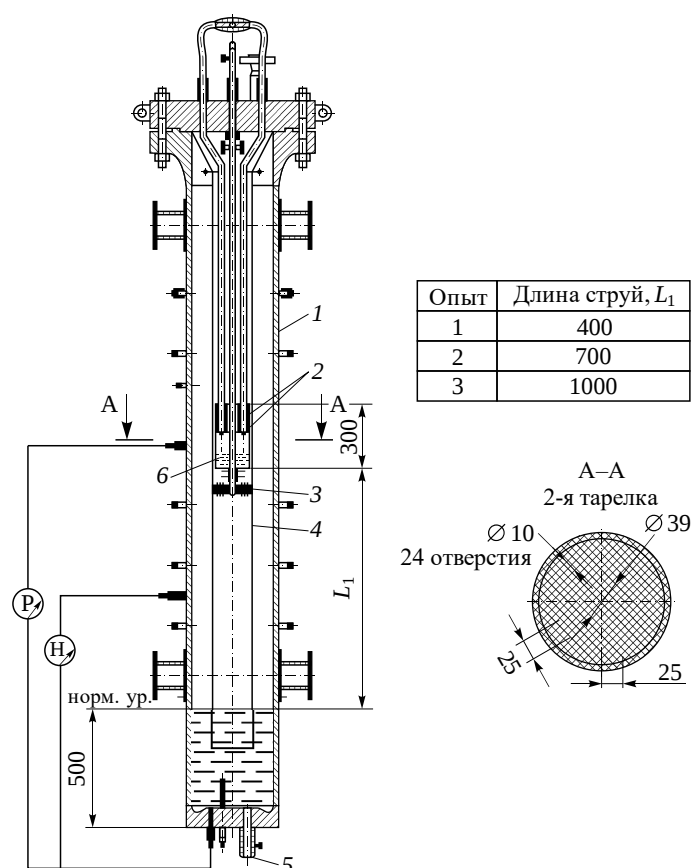


Рис. 1. Чертеж модели СППВ с одной тарелкой.

1 — корпус, 2 — патрубки подвода воды, 3 — парораздающий «крест»,  
 4 — выгородка, 5 — патрубок отвода нагретой воды и конденсата,  
 6 — водораспределительная тарелка; размеры приведены в миллиметрах.

Водоподающее устройство 2 представляло собой две заглушенные снизу трубы, в нижней части которых располагались отверстия для равномерной раздачи воды. На пароподводящей трубе закреплялись тарелки (6 на рис. 1) или (6 и 7 на рис. 2), выполненные в виде перфорированных листов. Над этими листами установлены стальные стаканы высотой 320 мм для обеспечения подпорного уровня воды над тарелками и равномерной ее раздачи по отверстиям в перфорированных листах. Совместный поток нагретой питательной воды и конденсата греющего пара отводится из модели через нижний патрубок 5. При проведении экспериментов выполнялись измерения давления, расхода и температуры потоков сред, поступающих в модель СППВ, и смеси потоков этих сред, выходящих из нее.

На подводящих и отводящих трубопроводах модели выполнялись следующие измерения:

- давление и температура пара на входе в модель (P1, T1);
- давление, температура и расход питательной воды на входе в модель (P2, T2, G2);

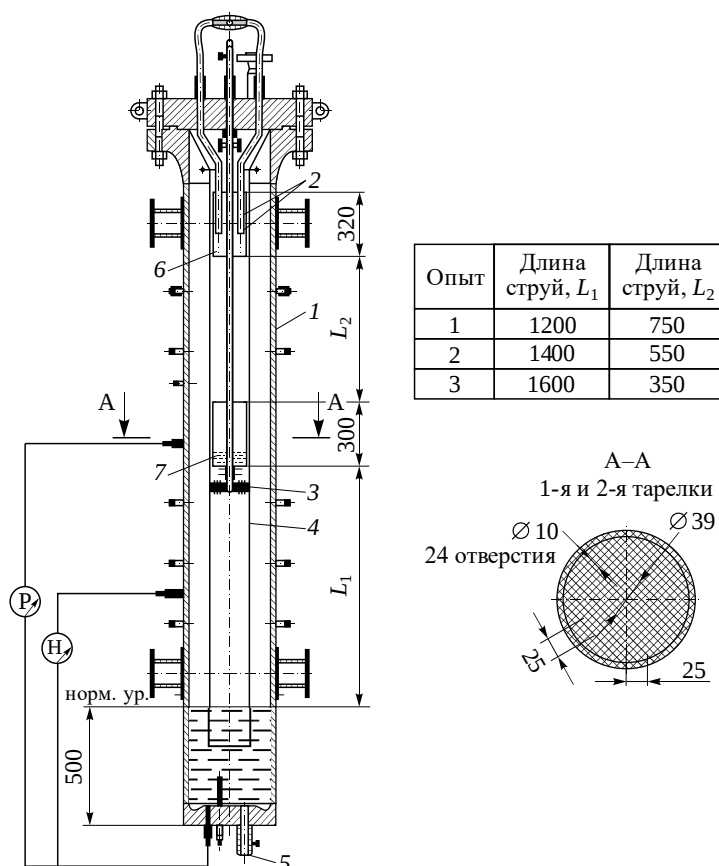


Рис. 2. Чертеж модели СППВ с двумя тарелками.

1 — корпус, 2 — патрубки подвода воды, 3 — парораздающий «крест»,  
4 — выгородка, 5 — патрубок отвода нагретой воды и конденсата,  
6, 7 — водораспределительные тарелки; размеры приведены в миллиметрах.

— давление, температура и расход смеси питательной воды и конденсата на выходе из модели (P3, T3, G3).

На модели выполнялись следующие измерения:

- давление среды в паровом объеме модели;
- перепады давления по высоте корпуса модели (уровень воды в модели).

Внутри модели выполнялись измерения температуры теплообменивающихся сред (три 12-зонных блоков кабельных термопар):

- температуры воды в стакане верхней (и нижней) тарелок;
- температура нагретой воды под уровнем в выгородке.

При измерении температуры среды в конкретном объеме использовалась разбивка данного объема на сечения, в каждом из сечений устанавливалось не менее двух термопар. Наличие достаточного количества термопар, а также контроль градуировкой показаний этих термопар относительно  $t_s$  при расположении градуируемых термопар в среде влажного пара (с одновременным измерением его давления) позволяли реально понизить погрешность определения разности температур  $t_s - t_l$  до 0,3 °C.

Более подробное описание экспериментальной модели, испытательного стенда и методики измерений изложено в работе [4].

### Результаты испытаний

На модели СППВ с одной и двумя тарелками проведено 41 и 54 стационарных опытов соответственно. Большинство опытов проведены при подаче в модель насыщенного пара.

С одной тарелкой опыты проведены в следующем диапазоне изменения режимных параметров:

- давление в паровом объеме модели  $5,44 \div 15,1$  МПа;
- расход пара на входе в модель  $0,76 \div 1,86$  т/ч;
- перегрев пара относительно температуры насыщения  $t_s$  на входе в модель  $\Delta t_{\text{пер}} = 0 \div 70,6$  °С;
- расход воды на входе в модель  $G_2 = 2,74 \div 4,00$  т/ч;
- недогрев воды относительно  $t_s$  на входе в модель  $\Delta t_s^{\text{вх}} = 60,21 \div 141,4$  °С;
- расстояние от тарелки до уровня воды в модели  $h = -0,24 \dots 1,28$  м (отрицательное значение  $h$  соответствует положению уровня воды выше тарелки);
- передаваемый тепловой поток в модели  $292 \div 677$  кВт;
- при  $h > 0,4$  м недогрев воды относительно  $t_s$  на выходе из модели составил  $\Delta t_s = 0,2 \div 2,0$  °С (среднее значение  $1,05$  °С); при  $h < 0,4$  м недогрев воды относительно  $t_s$  на выходе из модели несколько увеличивается ( $\Delta t_s = 1,0 \div 2,1$  °С, среднее значение —  $1,4$  °С).

С двумя последовательно установленными тарелками опыты проведены в следующем диапазоне режимных параметров:

- давление в паровом объеме модели  $4,21 \div 12,39$  МПа;
- перегрев пара относительно  $t_s$  на входе в модель  $\Delta t_{\text{пер}} = 0 \div 86$  °С;
- расход воды на входе в модель  $G_2 = 0,76 \div 4,48$  т/ч;
- недогрев воды относительно  $t_s$  на входе в модель  $\Delta t_s^{\text{вх}} = 73,4 \div 151,3$  °С;
- расстояние от тарелки до уровня воды в модели  $h = -0,26 \dots 1,46$  м;
- передаваемый тепловой поток в модели  $87 \div 785$  кВт;
- недогрев воды относительно  $t_s$  на выходе из модели  $\Delta t_s = 0,1 \div 1,0$  °С (среднее значение —  $0,48$  °С).

В опытах с двумя тарелками получено более низкое значение среднего недогрева воды до  $t_s$  на выходе из модели ( $\Delta t_s^{\text{сп}} = 0,48$  °С) по сравнению с опытами с одной тарелкой ( $\Delta t_s^{\text{сп}} = 1,05$  °С). Также снизилось и максимальное значение этого параметра ( $\Delta t_s^{\text{max}} = 1,0$  °С) по сравнению с  $2,1$  °С в опытах с одной тарелкой.

В обоих опытах с тарелками не отмечалось влияния расхода воды, ее недогрева до  $t_s$  на входе в модель, уровня нагретой воды в модели относительно расположения нижней тарелки (при  $h > 0,4$  м) и перегрева пара на входе в модель на выходное значение  $\Delta t_s$ .

Отсутствие влияния расхода воды на значение  $\Delta t_s$  при размере и скорости капли, зависящих лишь от давления среды, объясняется тем, что общая поверхность теплообмена капель пропорциональна их расходу, а в условиях занятости каплями менее 10 % сечения канала прогрев каждой капли автономен.

Отсутствие влияния перегрева на выходное весьма малое значение  $\Delta t_s < 1,0$  °С связывается:

- со скоротечностью процесса нагрева ( $1,8 \div 2,3$  с);

— с огромным отличием значений коэффициентов теплоотдачи на поверхности капли от перегретого пара ( $\alpha \approx 0,1 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ) и конденсацией пара при практическом отсутствии пленки конденсата ( $\alpha \approx 15 \text{ кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ).

### Тепловой расчет и совершенствование конструкции СППВ

В ОАО «НПО ЦКТИ» для теплового расчета смешивающих подогревателей низкого давления ( $p < 1 \text{ МПа}$ ) и деаэраторов с радиальным подводом греющего пара успешно применяется методика, основанная на струйной структуре потока воды в отсеке нагрева. Эта методика изложена в РТМ 108.038.03-83 [1]. Однако особенности физических свойств пара и воды при высоком давлении теплообменивающихся сред в СППВ и необходимость повышенного подогрева воды в нем (до  $92^\circ\text{C}$ ) требуют увеличения высоты отсека нагрева по сравнению с применяемыми смешивающими подогревателями низкого давления, что наряду с резким снижением поверхностного натяжения воды при ее высокой температуре и малым отличием плотности кипящей воды и насыщенного пара дает основание усомниться в сохранении струйной структуры потока воды в этих условиях и перехода ее в капельную структуру. Это, в частности, приведено в монографии С.С. Кутателадзе [5] без уточнения конкретных условий этого перехода. Исследования по распаду струи на капли в зависимости от поверхностного натяжения представлены также в работе В.Г. Левича [6].

Как показано в [4], для описания теплогидравлических процессов в аппарате можно использовать капельную модель [7, 8], в которой выходящие из отверстий тарелок струи «наталкиваются» на паровую среду высокой плотности и разбиваются на капли. При этом скорость капель уменьшается до скорости свободного падения капли воды плотностью не менее  $\rho'$  в паровой среде плотностью  $\rho''$ .

Результаты испытаний модели СППВ, проведенные в широком диапазоне изменения всех исходных параметров теплообменивающихся сред, позволяют утверждать, что при рассмотренном диапазоне высоких давлений ( $5,5 \div 15 \text{ МПа}$ ) выходящие через отверстия в отсек нагрева струи питательной воды разбиваются на мелкие капли ( $d_{\text{кап}} \approx 1,2 \div 1,8 \text{ мм}$ ). При этом на два порядка увеличивается поверхность их контакта со средой греющего пара (по сравнению со струями), а время прогрева воды в каплях сокращается до  $\approx 1 \div 2 \text{ с}$  и отличается от  $t_s$  на  $0,5 \div 1,5^\circ\text{C}$ , что соответствует высоте участка смешения  $h = 0,6 \div 0,7 \text{ м}$ .

### Выводы

1. На основе результатов экспериментального исследования модели узла нагрева СППВ безнапорной конструкции ЦКТИ показана реальная возможность достижения весьма малого недогрева питательной воды ( $\Delta t_s \leq 1^\circ\text{C}$ ) на выходе из СППВ во всех проектных режимах его работы.
2. Использование капельной модели предпочтительно для теплового расчета отсека нагрева СППВ.
3. Накопленные материалы позволяют создать на основе общепринятых в тепловом расчете соотношений (с определенной коррекцией ряда значений постоянных коэффициентов) методику теплового расчета смешивающих аппаратов, работающих при давлении  $4 - 15 \text{ МПа}$ .
3. Продемонстрирована устойчивая работа модели во всех проведенных опытах.

4. Предпочтительно двухступенчатое выполнение СППВ с «черновым подогревом» питательной воды в объеме между верхней и нижней тарелками до отличия ее температуры от  $t_s$  в среднем на  $1,5 \div 2$  °С. При этом высота падения водяных структур в паровом объеме между тарелками должна составлять  $0,6 \div 0,7$  м, а высота уровня воды над тарелками — не менее  $0,2 \div 0,25$  м в номинальном режиме работы СППВ (для создания равномерности раздачи воды по отверстиям в тарелках, температурного перемешивания воды под ее уровнем над нижней тарелкой и предотвращения неустойчивости подачи воды через отдельные отверстия).

5. «Чистой подогрев» питательной воды в объеме между нижней тарелкой и уровнем воды в СППВ должен осуществляться до среднего отличия ее температуры от  $t_s$  не более  $1,0$  °С. Малая загруженность нижней ступени нагрева должна повысить качество ее работы и равномерность прогрева водяных структур по сечению аппарата.

### Список литературы

1. РТМ 108.038.03-83. Подогреватели регенеративные смешивающие и схемы их включения. Расчет, проектирование и эксплуатация. Л.: НПО ЦКТИ, 1983. 31 с.
2. РТМ 108.030.21-78. Расчет и проектирование термических деаэраторов. Л.: НПО ЦКТИ, 1979. 127 с.
3. Сомова Е.В., Шварц А.Л., Туркин А.В. Экспериментальное обоснование конструкции смешивающего подогревателя высокого давления для перспективных энергоблоков // Теплоэнергетика. 2016. № 11. С. 68–73.
4. Сухоруков Ю.Г., Балунов Б.Ф., Лемехов В.В. Теплогидравлические испытания модели смешивающего подогревателя высокого давления // Теплоэнергетика. 2021. № 12. С. 68–75.
5. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
6. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. М.; Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2016. 686 с.
7. Лабунцов Д.А., Ягов В.В. Механика двухфазных систем. М.: Изд-во МЭИ, 2000. 347 с.
8. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / А.А. Александров, Б.С. Белосельский, А.Г. Вайнштейн [и др.]; под общ. ред. В.А. Григорьева, В.М. Зорина. М.: Издат. дом МЭИ, 2007. 561 с.

*Статья поступила в редакцию 2 августа 2024 г.,  
принята к публикации 8 ноября 2024 г.*