

$$\sin \frac{\pi}{l} \xi_1 = \frac{\Delta_1 + T_{\text{зад}} - \frac{4}{\pi} \exp \left[ -\left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 t_m \right]}{\frac{4}{l} \exp \left[ -\left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 (t_m - \tau_1) \right]},$$

$$\frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{l} x_1 \geq T_{\text{зад}}.$$

- При выполнении указанных условий зафиксировать значение  $n$  и определить размер секции:

$$r_1 = \frac{l}{n}.$$

- Проверять выполнение условий:

$$\sin \frac{\pi}{l} \xi_1 = \frac{l}{\pi} \exp \left[ -\left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 (2\tau_1 - \tau_2) \right] \times \left[ 1 - \exp \left[ -\left( \frac{\pi a}{l} \right)^2 (\tau_2 - \tau_1) \right] \right];$$

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределёнными параметрами. – М.: Высшая школа, 2003. – 299 с.
2. Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твёрдых тел. – М.: Высшая школа, 2001. – 550 с.
3. Першин И.М. Анализ и синтез систем с распределёнными параметрами. – Пятигорск: РИА КМВ, 2007. – 244 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1972. – 736 с.

Поступила 06.02.2009 г.

УДК 621.311

## АНАЛИЗ ПЕРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ВЕРТИКАЛЬНОГО СМЕШИВАЮЩЕГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Н.Н. Галашов

Томский политехнический университет  
E-mail: gal@tpu.ru

*Проведен анализ работы вертикального смешивающего подогревателя в переменных установившихся режимах при изменении давления пара в корпусе; расхода и температуры воды на входе в подогреватель и относительной величины отводимого выпара. Показано, что основные изменения температуры нагреваемой воды в подогревателе при работе в переменном режиме происходят в первом отсеке.*

#### Ключевые слова:

Смешивающий подогреватель, струйный отсек, нагрев, недогрев, выпар.

Подогреватели смешивающего типа нашли широкое применение на тепловых электростанциях, но до сих пор их процессы еще слабо изучены. Наибольшее внимание было уделено вопросам надежности работы подогревателей в переходных режимах при сбросах нагрузки [1, 2]. Вопросы теплообмена в смешивающих подогревателях исследованы в узком диапазоне давлений, всего до 0,13 МПа [3], в то время как существующие подогреватели работают при давлениях до 0,2 МПа, и предполага-

$$\frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{l} x_1 \geq T_{\text{зад}}.$$

- При выполнении указанных условий зафиксировать значение  $n$  и определить размер секции:

$$r_2 = \frac{l}{n}.$$

- Из полученных значений  $r_1$  и  $r_2$  выбрать меньшее:

$$r = \min \{r_1; r_2\}.$$

Если  $r_1 > r_2$ , т. е.  $r = r_2$ , то желаемый результат достигнут. Колебания, в пределах допустимой амплитуды, будут совершаться относительно заданного значения выходной функции.

Если  $r_1 < r_2$ , т. е.  $r = r_1$ , то амплитуда колебаний будет в пределах допустимой, но функция, совершая колебательные движения, будет медленно убывать и через определённое время выйдет за пределы допустимого интервала относительно заданного значения.

ется использовать их при более высоких давлениях. Имеются единичные исследования по изменению параметров в этих подогревателях при изменении режимов работы турбоустановки [4], которые не позволяют оценить влияние отдельных факторов на характеристики отсеков подогревателя, что требуется при проектировании подогревателей.

В данной работе рассматриваются вопросы изменения по греющим отсекам подогревателя нагрева воды  $\Delta t$  и ее недогрева до температуры насы-

шения  $\theta$  при изменении давления пара в корпусе  $P_n$ ; расхода  $G_b$  и температуры  $t_{b,вх}$  воды на входе в подогреватель и относительной величины отводимого выпара  $d_{вып}$  (килограмм выводимого из подогревателя пара на тонну проходящей воды). Для расчета процессов теплообмена в подогревателе выбрано уравнение нагрева пучка струй при поперечном обтекании их потоком пара [5], которое используется для проектирования струйных отсеков деаэраторов и применимо для давлений от 0,1 до 0,8 МПа.

Для анализа был спроектирован смешивающий подогреватель вертикального типа, состоящий из двух струйных отсеков. Схематическая конструкция подогревателя показана на рис. 1. Вода подводится на перфорированную тарелку верхнего отсека, на которой создается уровень воды  $h_1$ . С верхней тарелки вода струями сливается через отверстия в днище на тарелку нижнего отсека, на которой создается уровень воды  $h_2$ . Длина струй верхнего отсека  $L_1$ , нижнего –  $L_2$ . Пар подводится через центральную трубу в нижний отсек и, последовательно проходя между струями нижнего и верхнего отсеков, отдает тепло воде в процессе конденсации. Небольшой расход не сконденсировавшегося пара вместе с вышедшими из воды газами отводится из подогревателя как выпар.

Методика проектирования подогревателя описана в [6]. Подогреватель спроектирован на следующие параметры: давление пара в корпусе  $P_n=0,2$  МПа; расход воды в подогреватель  $G_b=200$  кг/с; температура воды на входе  $t_{b,вх}=80$  °С; относительная величины отводимого выпара  $d_{вып}=0,5$  кг/т. Принято, что в первом отсеке вода не догревается до температуры насыщения на  $\theta_1=5,6$  °С, а на втором на  $\theta_2=0,2$  °С. КПД подогревателя  $\eta=0,99$ . Диаметр отверстий в тарелках  $d=6$  мм. Отверстия располагаются в шахматном порядке по равностороннему треугольнику. Шаг между центрами отверстий  $t=20$  мм. При проектировании подогревателя учитывалось, что во всем диапазоне изменения варьируемых параметров не наступит предельных режимов работы отсеков.

В результате проектирования были получены следующие характеристики отсеков подогревателя.

Первый отсек (верхний): диаметр окружности пучка струй на входе отсека  $d_{вх1}=2049$  мм, на выходе отсека  $d_{вых1}=950$  мм; длина струи  $L_1=700$  мм; число отверстий на тарелке  $N_1=7468$ ; гидростатический уровень воды на верхней тарелке  $h_1=80$  мм; скорость выхода воды из отверстий тарелки  $\omega_{в1}=0,98$  м/с; средняя скорость пара в отсеке  $\omega_{п1}=0,87$  м/с.

Второй отсек (нижний): диаметр окружности пучка струй на входе отсека  $d_{вх2}=900$  мм, на выходе отсека  $d_{вых2}=2088$  мм; длина струи  $L_2=645$  мм; число отверстий на тарелке  $N_2=8040$ ; гидростатический уровень воды на верхней тарелке  $h_2=83$  мм; скорость воды в отверстиях тарелки  $\omega_{в2}=0,99$  м/с; средняя скорость пара в отсеке  $\omega_{п2}=6,67$  м/с.

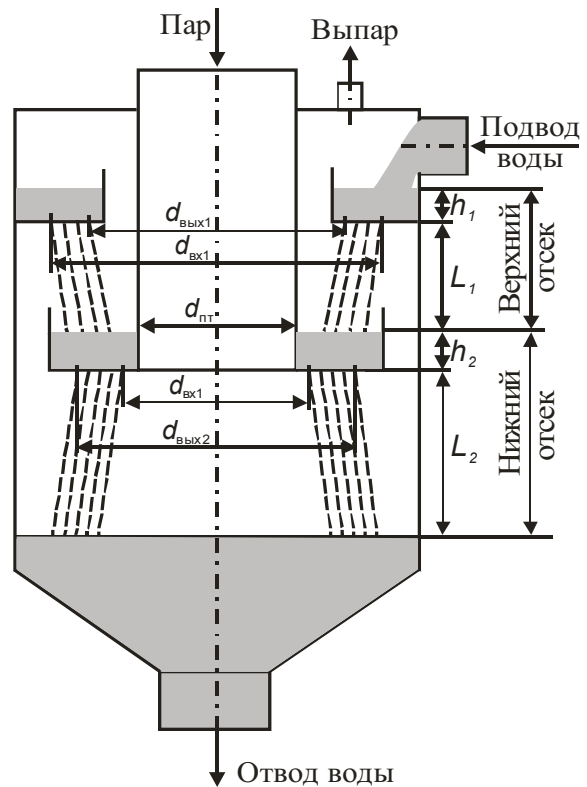


Рис. 1. Схематическая конструкция подогревателя

Для анализа работы подогревателя в переменном режиме в пакете Microsoft Office Excel была составлена программа расчета отсеков подогревателя. Параметры воды и пара определялись на основе программы «WaterStreamPro». Принято, что в подогреватель в любых режимах поступает сухой насыщенный пар.

Расчеты производятся по следующему алгоритму:

По  $P_n$  определяем температуру насыщения  $t_s$ , удельный объем  $v''$  и энтальпию  $h''$  насыщенного пара. По  $P_n$  и  $t_{b,вх}$  определяем удельный объем  $v_{в1}$  и энтальпию  $h_{b,вх1}$  воды на входе первого отсека.

Расчет верхнего струйного отсека.

1. Принимаем недогрев воды до температуры насыщения в первом отсеке  $\theta_{п1}$ .
2. Находим температуру воды на выходе отсека  $t_{b,вых1}+t_s-\theta_{п1}$  и по  $P_n$ ,  $t_{b,вых1}$  энтальпию воды на выходе  $h_{b,вых1}$ . Расход пара на выходе отсека  $D_{п,вых1}=d_{вып}G_b/1000$ . Определяем расход конденсирующегося в отсеке пара по формуле  $D_{пк1}=G_{b,вх}(h_{b,вых1}-h_{b,вх1})/(h''-h_{b,вых1})/\eta$ . Расход пара на входе отсека  $D_{п,вх1}=D_{п,вых1}+D_{пк1}$ . Нагрев воды в отсеке  $\Delta t_1+t_{b,вых1}-t_{b,вх1}$ .
3. Находим скорость воды в отверстиях тарелки  $\omega_{в1}=4G_{b,вх}v_{в1}/(\pi d^2 N_1)$  и высоту гидростатического уровня воды на верхней тарелке  $h_1+\omega_{в1}^2/(2g\mu^2)$ , где  $g=9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $\mu=0,776$  – коэффициент расхода в отверстиях тарелки.

4. Определяем площади сечений для прохода пара на входе и выходе струйного отсека по формулам:  $F_{вх1} = L_1 \pi d_{вх1} (1 - d/t)$ ;  $F_{вых1} = L_1 \pi d_{вых1} (1 - d/t)$  и скорости пара в этих сечениях по формулам:  $\omega_{вх1} = D_{п.вх1} v'' / F_{вх1}$ ;  $\omega_{вых1} = D_{п.вых1} v'' / F_{вых1}$ .
5. Средняя скорость пара в отсеке определяется как  $\omega_{пл} = (\omega_{вх1} - \omega_{вых1}) / \ln(\omega_{вх1} / \omega_{вых1})$ .
6. Из формулы нагрева пучка струй [5] находим расчетную температуру воды на выходе из отсека  $t_{в.вых1р} = t_s - (t_s - t_{в.вх1}) / (10^{A L_1 (\omega_{пл} / \omega_{вх1})^{0.3} / d^{0.7}})$ , где  $A$  определяем по [5, рис. 3.12] в зависимости от  $P_{п}$ .
7. Расчетный недогрев воды до температуры насыщения в первом отсеке  $\theta_{1р} = t_s - t_{в.вых1р}$ .
8. Определяем относительную погрешность между принятым и расчетным недогревом воды в отсеке  $\delta\theta_1 = (|\theta_{1п} - \theta_{1р}| 100) / \theta_{1п}$ , если  $\delta\theta_1 < 0,5\%$ , то расчет отсека заканчиваем, если больше, то принимаем  $\theta_{1п} = \theta_{1р}$  и расчет повторяем с пункта 2.

Расчет нижнего струйного отсека производится по тому же алгоритму, что и для верхнего.

С помощью программы были проведены расчеты для давлений пара  $P_{п}$  в интервале 0,1...0,3 МПа; для расходов воды  $G_{в.вх}$  в интервале 100...300 кг/с; для температур воды на входе  $t_{в.вх}$  в интервале 60...100 °С и для относительного расхода выпара  $d_{вып}$  в интервале 0,001...1 кг/т.

По результатам расчетов построены зависимости  $\Delta t$  и  $\theta$  для первого и второго отсеков от изменяемых параметров, рис. 2–9.

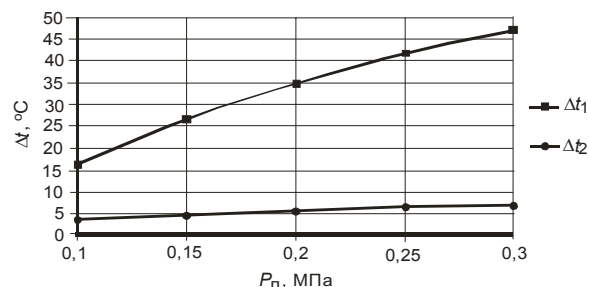


Рис. 2. Зависимость нагрева воды в отсеках от давления

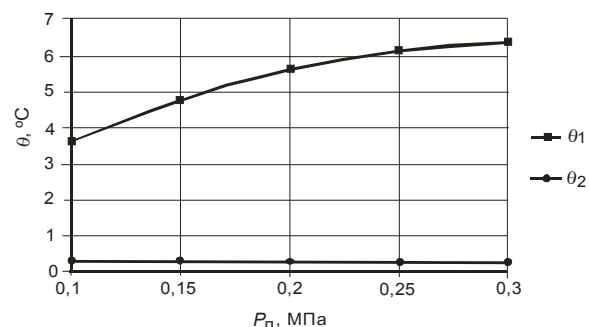


Рис. 3. Зависимость недогрева воды в отсеках от давления

Из рис. 2 и 3 видно, что при росте давления пара в подогревателе и постоянных остальных параметрах основной прирост нагрева и недогрева воды происходит в первом отсеке. Это объясняется большим температурным напором в первом отсеке по сравнению со вторым.

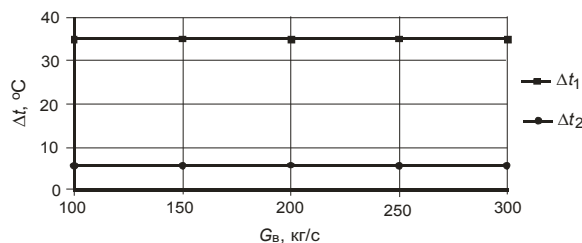


Рис. 4. Зависимость нагрева воды в отсеках от расхода воды

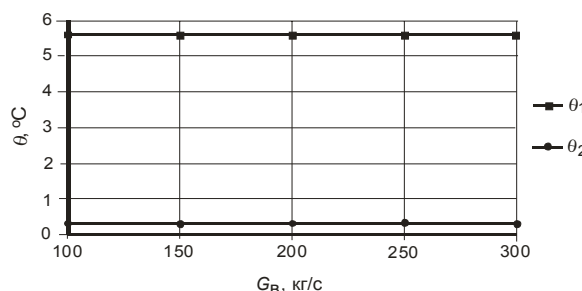


Рис. 5. Зависимость недогрева воды в отсеках от расхода воды

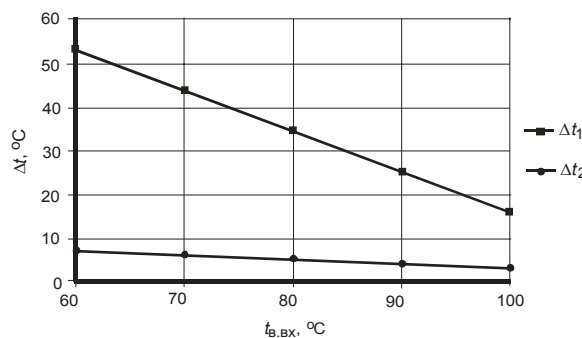


Рис. 6. Зависимость нагрева воды в отсеках от температуры воды на входе

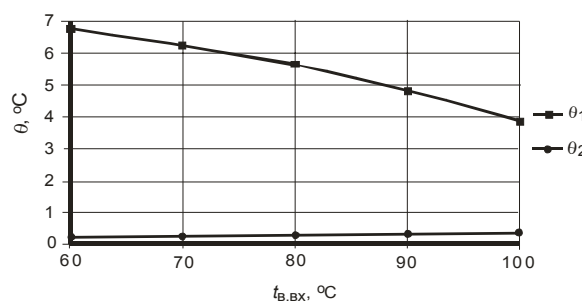


Рис. 7. Зависимость недогрева воды в отсеках от температуры воды на входе

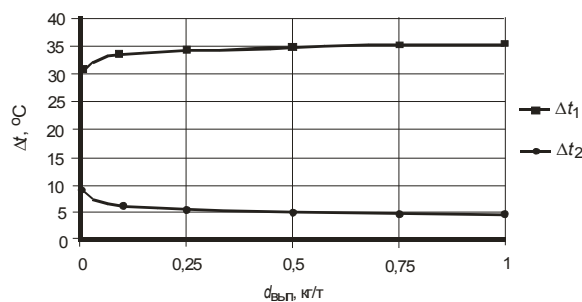
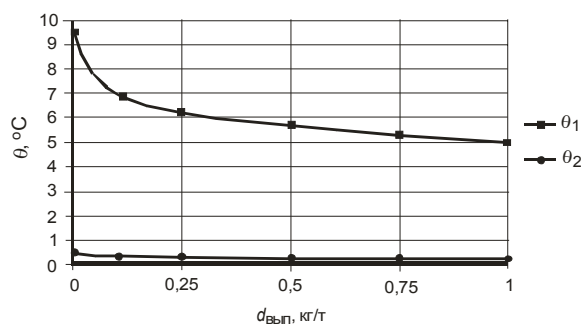


Рис. 8. Зависимость нагрева воды в отсеках от относительного расхода выпара



**Рис. 9.** Зависимость недогрева воды в отсеках от относительного расхода выпара

Рис. 4 и 5 показывают, что при изменении только расхода воды в подогреватель нагрев и недогрев воды в обоих отсеках остаются постоянными. Объясняется это тем, что остается постоянным отношение скоростей воды и пара в отсеке.

При увеличении температуры воды на входе подогревателя происходит сильное падение нагрева в первом отсеке и небольшое во втором (рис. 6), что объясняется большим снижением температурного напора в первом отсеке и небольшим во втором. Этот же фактор объясняет существенное измене-

ние недогрева в первом отсеке и слабое во втором (рис. 7).

Выпар существенно начинает влиять при относительной величине ниже 0,1 кг/т (рис. 8, 9). При этом происходит быстрое падение скорости пара в первом отсеке и сильно растет недогрев воды (рис. 9), что ведет к снижению нагрева в отсеке (рис. 8). Во втором отсеке скорость пара снижается мало, поэтому недогрев растет слабо, но из-за снижения температуры воды на входе температурный напор увеличивается, а это приводит к увеличению нагрева. Таким образом, увеличение недогрева в первом отсеке компенсируется увеличением нагрева во втором.

#### Выводы

Показано, что основные изменения нагрева и недогрева воды в смешивающем подогревателе при работе в переменном режиме происходят в первом отсеке. Наибольшее влияние на нагрев и недогрев оказывают изменение давления пара в подогревателе и температуры воды на входе; изменение расхода воды не влияет на нагрев и недогрев, а выпар начинает влиять при относительном расходе меньше 0,1 кг/т.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермолов В.Ф., Пермяков В.А., Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л. Смешивающие подогреватели паровых турбин. — М.: Энергоиздат, 1982. — 208 с.
2. Ефимочкин Г.И. Бездеаэрационные схемы паротурбинных установок. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 232 с.
3. Ефимочкин Г.И. К расчету смешивающих подогревателей с безнапорным струйным водораспределением // Теплоэнергетика. — 1982. — № 11. — С. 43–45.
4. Ефимочкин Г.И., Вербицкий В.Л., Шипилов С.Г. Статические испытания системы регенерации турбоустановки 300 МВт со смешивающими подогревателями низкого давления // Электрические станции. — 1975. — № 11. — С. 36–38.
5. Рихтер Л.А., Елизаров Д.П. Вспомогательное оборудование тепловых электростанций. — М.: Энергия, 1987. — 216 с.
6. Шаклеина Е.В., Галашов Н.Н. Исследование зависимости конструктивных характеристик вертикальных смешивающих подогревателей от параметров пара и расхода воды на входе // Современные техника и технологии: Труды XII Междунар. научно-практ. конф. молодых ученых. — Томск, 2006. — Т. 2. — С. 421–423.

Поступила 08.10.2008 г.