

ТЕПЛООБМЕН В ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СЕПАРАТОРАХ–
ПАРОПЕРЕГРЕВАТЕЛЯХ ТИПА СПП-500 ВЛАЖНОПАРОВЫХ ТУРБИН АЭС

Развитие промышленного потенциала неразрывно связано с ростом потребления энергии. В ближайшие десятилетия намечено значительное развитие атомной энергетики в России. Экономичность АЭС во многом определяется надежной работой оборудования турбоустановки. Для турбин насыщенного пара одной из важнейших является задача уменьшения влагосодержания в проточной части. Для её решения сочетают промежуточную — между ЦВД и ЦНД — сепарацию влаги из пара с двухступенчатым перегревом отборным и острым паром в сепараторах-пароперегревателях (СПП). До настоящего времени на АЭС с РБМК-1000 применяются аппараты типа СПП-500-1, практически исчерпавшие свои ресурсы для обеспечения достаточного уровня собственной надёжности и эффективности. В данной работе авторы продолжают цикл исследований аппаратов СПП, направленных на повышение экономичности и увеличение эффективности работы турбоустановок, предлагая модернизацию на основе конструктивной схемы аппарата СПП-500.

В связи с тем, что определяющее влияние на величину коэффициента теплопередачи k_i

$$k_i = \frac{1}{\frac{d_{\text{НАР}}}{\alpha_{\text{ГП}i} d_{\text{ВН}}} + \frac{d_{\text{НАР}}}{2\lambda_{\text{СТ}i}} \ln\left(\frac{d_{\text{НАР}}}{d_{\text{ВН}}}\right) + \frac{1}{\alpha_{\text{НП}i}}}$$

в обеих ступенях ($i=I, II$) СПП-500 оказывает коэффициент теплоотдачи со стороны нагреваемого пара (НП) $\alpha_{\text{НП}i}$ [1], методике его расчёта нами уделено особое внимание.

НП (для номинального режима работы аппарата характерные безразмерные числа подобия составляют $Re_I \sim 4.8 \cdot 10^4$, $Pr_I \sim 0.96$; $Re_{II} \sim 5.7 \cdot 10^4$, $Pr_{II} \sim 0.93$) перегревается в межтрубном пространстве горизонтальных змеевиковых спиральных коридорных пучков труб, $d_{\text{НАР}} = 18$ мм, $d_{\text{ВН}} = 15.2$ мм с относительным поперечным $x_1 \sim 1.14$ и продольным $x_2 \sim 1.11$ шагами. Поправки на число рядов z в направлении потока НП для нашего случая $z > 15$ малы.

Для определения среднего значения теплоотдачи поперечнообтекаемых пучков гладких труб рекомендуются обобщённые зависимости вида $Nu = C Re^m Pr^n$. В различных литературных источниках [2-6] для подобных систем предложены зависимости, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Проектные и расчётные характеристики теплообмена в СПП-500.

Расчётные зависимости	1 ступень					2 ступень				
	Nu	$\alpha_{\text{НП}},$ Вт/(м ² К)	$k,$ Вт/(м ² К)	$S_p,$ м ²	$\eta,$ %	Nu	$\alpha_{\text{НП}},$ Вт/(м ² К)	$k,$ Вт/(м ² К)	$S_p,$ м ²	$\eta,$ %
$0.2Re^{0.64}Pr^{0.35}$, данные из [2]	200	330	310	1900	11	220	440	420	1200	0
$0.2Re^{0.64}Pr^{0.35}$ [2]	200	330	320	1900	15	220	440	430	1200	1
$0.22Re^{0.65}Pr^{0.36}$ [3]	240	400	390	1500	39	260	540	520	990	23
$0.2Re^{0.65}Pr^{0.33}$ [4]	220	360	350	1700	27	240	490	480	1100	13
$0.2C_5Re^{0.65}Pr^{0.33}$ [5]	250	420	400	1500	44	280	560	540	960	28
$0.27Re^{0.63}Pr^{0.35}$ [6]	240	400	380	1600	37	260	530	510	1000	21

$$C_5 = [1 + (2x_1 - 3)(1 - 0.5x_2)^3]^{-2}.$$

Значения коэффициентов теплоотдачи НП вычислялись по формуле $\alpha_{\text{НП}i} = Nu_i \lambda_{\text{СТ}i} / d_{\text{НАР}}$, коэффициенты теплопроводности стенок трубок пучка $\lambda_{\text{СТ}i} = f(t_{\text{СТ}i})$ определялись методом линейных интерполяций по таблицам теплофизических свойств стали X18H10T при средней

температуре стенки, $t_{СТП} \sim 210^\circ\text{C}$, $t_{СТП} \sim 280^\circ\text{C}$. Расчётные коэффициенты теплоотдачи греющего пара (ГП) в приближении полной конденсации движущегося водяного пара внутри горизонтальных труб пучка составили $\alpha_{ГП} \sim 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°К})$, $\alpha_{ГП} \sim 1.5 \cdot 10^4 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{°К})$. Расчёт необходимой поверхности теплообмена производился по формуле $S_{Pi} = Q_i / (k_i \Delta t_i)$. Значения тепловой мощности, проходящей через поверхность теплообмена, равны $Q_I \sim 1.9 \cdot 10^7 \text{ Вт}$, $Q_{II} \sim 1.8 \cdot 10^7 \text{ Вт}$. Температурный напор при постоянной температуре одного из теплоносителей — конденсирующегося ГП — определялся как среднелогарифмическая разность температур и составил $\Delta t_I \sim 30^\circ\text{C}$, $\Delta t_{II} \sim 35^\circ\text{C}$. Конструктивная поверхность нагрева аппарата СПП-500 составляет $S_{KI} \sim 2140 \text{ м}^2$, $S_{KII} \sim 1220 \text{ м}^2$. Коэффициент запаса поверхности нагрева определялся как $\eta = S_K / S_p$.

Проведённым сопоставлением проектных параметров с расчётными установлено:

1. Проектные запасы поверхности нагрева составляют $\eta_1 \sim 11\%$, $\eta_2 < 1\%$.
2. Расчёт по зависимости [2], используемой при разработке аппарата, показал близкие к проектным запасы $\eta_1 \sim 15\%$, $\eta_2 \sim 1\%$ и наименьшие из рассчитанных по зависимостям [2-6].
3. Расчёт по зависимостям [3-6] показал более высокие запасы $\eta_1 \sim (27 \dots 44)\%$, $\eta_2 \sim (13 \dots 28)\%$.
4. Отличие результатов можно объяснить тем, что зависимости «позднего» периода охватывают больший диапазон параметров, получены при более высокой точности проведения экспериментов и обработки их результатов.
5. Более высокие запасы поверхности нагрева, полученные по зависимостям [3-6] могут рассматриваться как преимущество СПП-500 перед СПП-500-1, проектные запасы которого ($\eta_1 \sim 3\%$, $\eta_2 < 1\%$ [7]) уже исчерпаны из-за частичного глушения поверхности теплообмена.
6. Для обоснования указанного преимущества конструктивной схемы СПП-500 необходимо проведение испытаний на проектных параметрах и экспериментов на натуральных аппаратах.
7. Учитывая, что для такого оборудования рекомендуемые в настоящее время запасы поверхностей нагрева составляют $\eta \sim 10\%$, можно утверждать, что аппараты СПП-500 соответствуют требованиям по этому параметру даже в случае оценки по зависимости [4].

Проектные гидравлические потери НП в перегревателе СПП-500 $\Delta p \sim 0.012 \text{ МПа}$ [2] не превосходят таковые для СПП-500-1 $\Delta p \sim 0.015 \text{ МПа}$ [7] и составляют более 60 % от общего сопротивления аппарата, обеспечивая равномерное распределение потока НП по каналам сепаратора СПП-500 и высокую эффективность сепарации.

Высота СПП-500 на 35% меньше высоты СПП-500-1 при одинаковых диаметрах.

В настоящее время к исследованиям привлекаются эксплуатационные данные АЭС. Продолжается совершенствование методик теплогидравлических расчётов СПП. Полученные результаты дают основания для разработки рекомендаций конструктивного принципа аппарата СПП-500 как перспективного при модернизации систем ПСПП в России.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Егоров М.Ю. Труды XVI Шк.-сем. «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках». — М.: Издательский дом МЭИ. — Т. 2. С. 267-270.
2. Рабочий проект промежуточного СПП для турбины К-500-65/3000. — Л.: НПО ЦКТИ, 1969. — 34 с.
3. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. — М.: Энергия, 1977. — 343 с.
4. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 359 с.
5. Будов В.М. Материалы Международной шк.-сем. «Гидродинамика и конвективный теплообмен в теплообменниках». — Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова, 1981. С. 5–15.
6. Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассообмен. — М.: МЭИ, 2005. — 550 с.
7. Расчёт промежуточного СПП турбины К-500-65/3000. Рабочий проект ФР-00170. — Подольск: Подольский машиностроительный завод им. Орджоникидзе, 1972. — 14 с.