

УТВЕРЖДАЮ
Директор ЭНИН
Матвеев А.С.
" " 2015г.

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к практическим занятиям по дисциплине
Парогенераторы АЭС**

2014 г.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ
по дисциплине “Парогенераторы АЭС”

Тема 1. Тепловые балансы и tQ - диаграммы парогенераторов АЭС

Варианты 1-15

Условие задачи

Парогенератор с водяным теплоносителем для выработки насыщенного пара с естественной циркуляцией рабочего тела в испарителе (И).

Имеет (может не иметь) экономайзерный участок (Э). Рабочее тело омывает трубки ПГ снаружи, теплоноситель движется в трубках. Схема относительного движения теплоносителя и рабочего тела - противоток.

Необходимо:

- составить тепловой баланс парогенератора (найти тепловую мощность $Q_{нг}$);
- вычислить общий расход теплоносителя G ;
- построить tQ – диаграмму;
- определить температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ;
- определить минимальный температурный напор в испарителе $\Delta t_u^{мин}$;
- найти средние температуры теплоносителя, рабочего тела и средние температурные напоры во всех характерных элементах ПГ;
- рассчитать число теплообменных труб $n_{тр}$.

Примечания:

- исходные данные взять по таблице 1 исходные данных к ИДЗ №1;
- потерями давления в элементах ПГ пренебречь;
- температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ искать через решение соответствующих тепловых балансов;
- tQ – диаграмму строить в масштабе.

+

Варианты 16-20

Условие задачи

Прямоточный парогенератор с водяным теплоносителем для выработки перегретого пара состоит из скомпонованных в общем корпусе экономайзера (Э), испарителя (И) и основного пароперегревателя (ПЕ).

Рабочее тело омывает трубки ПГ снаружи, теплоноситель движется в трубках. Схема относительного движения теплоносителя и рабочего тела - противоток.

Необходимо:

- составить тепловой баланс парогенератора (найти тепловую мощность $Q_{нг}$);
- вычислить общий расход теплоносителя G ;
- построить tQ – диаграмму;
- определить температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ;
- определить минимальный температурный напор в испарителе $\Delta t_u^{мин}$;
- найти средние температуры теплоносителя, рабочего тела и средние температурные напоры во всех характерных элементах ПГ;
- рассчитать число теплообменных труб $n_{тр}$.

Примечания:

- исходные данные взять по таблице 1 исходные данных к ИДЗ №1;
- потерями давления в элементах ПГ пренебречь;
- температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ искать через решение соответствующих тепловых балансов;
- tQ – диаграмму строить в масштабе.

Таблица 1. Исходные данные к ИДЗ №1

Показатель	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип ПГ	Насыщенного пара, с ЕЦ									
Вид т/н	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода
D_2 , кг/с	300	200	275	175	180	220	225	200	400	240
p_1 , МПа	15,5	16	17	15	12,3	11	15,7	11	15,7	15,5
t_1' , °С	320	330	335	320	300	292	322	300	330	325
t_1'' , °С	289	295	290	280	269	260	295	270	295	288
p_2 , МПа	6,27	7	7	5,6	4,7	4,1	7,0	4,7	6,5	6,27
t_2'' , °С	$t_{нас}$									
$t_{не}$, °С	210	225	215	200	217	210	185	190	220	195
α_{np} , %	0,5	0,3	0,5	0,5	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5
ТТС	Э+И									

Окончание табл. 1

Показатель	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип ПГ	Насыщенного пара, с ЕЦ					Перегретого пара, прямоточный				
Вид т/н	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода	вода
D_2 , кг/с	270	230	190	290	200	180	230	180	290	250
p_1 , МПа	14,5	15,7	17	11	12	18	16,5	14,5	18	15,5
t'_1 , °С	322	322	334	303	310	340	329	325	340	329
t''_1 , °С	285	294	292	273	280	307	295	285	301	295
p_2 , МПа	6	7,06	6,8	4,7	5,5	8	7	6,5	7,5	7
t''_2 , °С	$t_{нас}$					325	317	312	322	320
$t_{нв}$, °С	200	230	215	210	205	210	200	190	210	200
α_{np} , %	0,4	0,5	0,5	0,4	0,4					
ТТС	Э+И									

Варианты 21-40

Условие задачи

Прямоточный парогенератор с жидкометаллическим теплоносителем для выработки перегретого пара состоит из скомпонованных в отдельные модули экономайзера (Э), испарителя (И), основного пароперегревателя (ПЕ) и промежуточного пароперегревателя (ПП).

Теплоноситель омывает трубки ПГ снаружи, рабочее тело движется в трубках. Схема относительного движения теплоносителя и рабочего тела во всех модулях - противоток.

1. Ручным расчетом необходимо:

- составить тепловой баланс парогенератора (найти тепловую мощность Q_{ne});
- вычислить общий расход теплоносителя G и расходы теплоносителя через отдельные модули $G_{э}$, G_u , G_{ne} , G_{nn} ;
- определить температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ;
- построить tQ – диаграмму;
- определить минимальный температурный напор в испарителе $\Delta t_u^{мин}$;
- найти средние температуры теплоносителя, рабочего тела и средние температурные напоры во всех характерных элементах ПГ;
- рассчитать число теплообменных труб в отдельных модулях ПГ.

Примечания:

- исходные данные взять по таблице 2 исходные данных к ИДЗ №1;
- потерями давления в элементах ПГ пренебречь;
- температуры теплоносителя на границах характерных элементов ПГ искать через решение соответствующих тепловых балансов;
- tQ – диаграмму строить в масштабе.

Таблица 2. Исходные данные к ИДЗ №1

Показатель	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип ПГ	Перегретого пара, прямоточный									
Вид т/н	Жидкий натрий					Жидкий калий				
D_2 , кг/с	170	100	150	250	100	200	120	170	100	150
p_2 , МПа	13,7	12	15	15	11	14	13	13,7	12	15
t_2'' , °С	540	530	545	535	525	550	540	540	530	545
$t_{нв}$, °С	240	240	220	200	190	229	190	240	240	220
p_1 , МПа	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t_1' , °С	560	560	570	555	545	570	560	560	560	570
t_1'' , °С	340	340	350	350	310	350	330	340	340	350
D_{nn} , кг/с	136	80	120	200	80	160	96	136	80	120
p_{nn} , МПа	3	3	4	3	3	4	3	3	3	3
$t_{нн.вх}$, °С	300	300	320	290	300	320	290	280	300	280
$t_{нн.вых}$, °С	540	530	545	535	535	550	540	450	458	450
Схема движения т/н	→ (ПП II ПЕ) → И → Э						→ ПЕ → (ПП II И) → Э			

Окончание табл. 2

Показатель	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Тип ПГ	Перегретого пара, прямоточный									
Вид т/н	Жидкий натрий					Жидкий калий				
D_2 , кг/с	250	100	200	120	170	100	150	250	100	200
p_2 , МПа	15	11	14	13	13,7	12	15	15	11	14
t_2'' , °С	535	525	550	540	540	530	545	535	525	550
$t_{не}$, °С	200	190	229	190	240	240	220	200	190	229
p_1 , МПа	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
t_1' , °С	555	545	570	560	560	560	570	555	545	570
t_1'' , °С	350	310	350	330	340	340	350	350	310	350
D_{nn} , кг/с	200	80	160	96	136	80	120	200	80	160
p_{nn} , МПа	3	3	4	3	2	2	3	2	2,5	2,5
$t_{nn.вх}$, °С	290	300	320	290	250	250	280	250	250	276
$t_{nn.вых}$, °С	459	435	454	440	370	366	380	390	350	376
Схема движения т/н	→ ПЕ → (ПП II И) → Э					→ ПЕ → И → (ПП II Э)				

Вопросы к защите задания

1. На какие специфические участки разбивают теплообменную поверхность парогенератора?
2. Дайте определение понятию «Экономайзер».
3. Дайте определение понятию «Испаритель».
4. Дайте определение понятию «Пароперегреватель».
5. Дайте определение понятию «Промежуточный пароперегреватель».
6. Какой элемент поверхности нагрева в обязательном порядке входит в состав парогенератора АЭС?
7. Чем объясняется необходимость поддержания высокого давления теплоносителя в реакторах типа ВВЭР?
8. Чем объясняется низкий уровень параметров рабочего тела в парогенераторах, с водяным теплоносителем?
9. Чем объясняется невысокий уровень давления жидкометаллического теплоносителя в реакторах типа БН?
10. Как объяснить необходимость большого расхода теплоносителя в парогенераторах АЭС с реакторами типа ВВЭР?
11. Каким образом в парогенераторах насыщенного пара практически реализуется теплотехническая схема с экономайзерным участком?
12. Дайте определение понятию «Температура циркуляционной воды».
13. Поясните как выбор минимального температурного напора в испарителе $\Delta t_H^{мин}$ влияет на экономичность цикла паротурбинной установки?
14. Чем объясняется большая разность между температурами входа и выхода жидкометаллического теплоносителя в парогенераторе энергоблока с реактором на быстрых нейтронах?
15. Почему для парогенераторов с жидкометаллическим теплоносителем обычно выбирается подъемная схема движения рабочего тела в испарителе?

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ
по дисциплине “Парогенераторы АЭС”

Тема 2. Исследование теплообмена со стороны кипящего рабочего тела

Условие задачи

Парогенератор насыщенного пара, обогреваемый водой под давлением, с погруженной поверхностью теплообмена. Экономайзерный участок отсутствует. Теплоноситель (некипящая вода) движется внутри теплообменных труб, кипящая вода - снаружи. Со стороны рабочего тела поверхность трубок покрыта слоем отложений.

Необходимо:

- построить tQ – диаграмму;
- для входного и выходного сечений tQ – диаграммы провести расчет коэффициентов теплоотдачи $\alpha_{2вх}$ и $\alpha_{2вых}$ от стенки труб к рабочему телу;
- вычислить соответствующие коэффициенты теплопередачи $k_{вх}$, $k_{вых}$ и средний коэффициент теплопередачи $k_{ср}$;
- рассчитать критический тепловой поток $q_{кр}$.

Примечания:

- стенку трубы рассматривать как плоскую стенку;
- теплопроводность слоя отложений принять равной $\lambda_{отл} = 2,5$ Вт/(м·К);
- в качестве начального приближения плотности теплового потока можно принять для входа (по направлению теплоносителя) $q_{вх} = 3 \cdot 10^5$ Вт/м²; для выхода $q_{вых} = 6 \cdot 10^4$ Вт/м²;
- расчет коэффициента теплопроводности материала стенки $\lambda_{см}$ вести по средней температуре стенки, оцениваемой приближенно как среднее арифметическое температур теплоносителя t_1 и рабочего тела t_2 в соответствующем сечении;
- расчет критического теплового потока вести по формуле

$$q_{кр} = 0,16 \cdot r \cdot \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{\sigma \cdot g \cdot (\rho' - \rho'')},$$

где r - теплота парообразования, Дж/кг;

σ - коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

g - ускорение свободного падения, м/с²;

ρ' , ρ'' - плотность воды и пара в состоянии насыщения, кг/м³;

- расчет коэффициента теплоотдачи со стороны рабочего тела вести по следующим формулам:

1 - формула Кирилова П.Л. $\alpha_2 = 10,45 \cdot q^{0,7} / [3,3 - 0,0113 \cdot (T_{s2} - 373)]$;

2 – формула Кузьмина А.В. $\alpha_2 = \begin{cases} 5,728 \cdot p^{0,2} \cdot q^{2/3} & \text{при } 0,1 \leq p \leq 3 \text{ МПа} \\ 3,195 \cdot p^{3/4} \cdot q^{2/3} & \text{при } 3 < p \leq 20 \text{ МПа} \end{cases}$;

3- формула ЦКТИ $\alpha_2 = 4,36 \cdot q^{0,7} \cdot (p^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} \cdot p^2)$,

где p - давление рабочего тела, МПа;

T_{s2} - температура насыщения при давлении рабочего тела, К;

q - плотность теплового потока, Вт/м².

Таблица 1. Исходные данные

Параметр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t_1', C°	322	314	327	332	324	327	315	330	311	315
t_1'', C°	292	294	297	302	304	303	280	305	290	275
$p_2, \text{МПа}$	6,4	6,5	6,0	7,4	7,5	7,0	5,5	8,0	6,0	6,5
$\alpha_1, \text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ)$	23	20	31	18	19	22	23	19	20	15
$\delta_{ст}, \text{мм}$	1,0	1,2	1,4	1,5	1,4	2,0	1,3	1,4	1,2	1,4
$\delta_{отл}, \text{мм}$	0,1				0,2			0,3		
Номер формулы	1	2	3	2	3	1	1	2	3	1
Материал трубки	X18H10T					15XM				

Продолжение 1 табл. 1

Параметр	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
t_1', C°	317	320	300	310	315	302	304	303	280	300
t_1'', C°	280	290	270	270	280	270	260	265	240	280
$p_2, \text{МПа}$	6,0	7,0	6,0	7,0	8,0	4,8	3,6	4,0	2,5	5,1
$\alpha_1, \text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ)$	15	20	20	25	18	12	15	14	20	15
$\delta_{ст}, \text{мм}$	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2	0,8	1,0	1,4	1,2	0,8
$\delta_{отл}, \text{мм}$	0,2				0,1			0,3		
Номер формулы	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Материал трубки	15XM					X18H10T				

Продолжение 2 табл. 1

Параметр	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
t_1', C°	320	318	297	305	315	305	308	313	285	305
t_1'', C°	280	290	270	270	280	270	260	265	240	280
$p_2, \text{МПа}$	6,0	7,0	6,0	7,0	8,0	4,8	3,6	4,0	2,5	5,1
$\alpha_1, \text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ)$	17	22	18	22	19	14	18	16	19	17
$\delta_{ст}, \text{мм}$	1,2	1,4	1,2	1,4	1,2	0,8	1,0	1,4	1,2	0,8
$\delta_{отл}, \text{мм}$	0,1				0,2			0,3		
Номер формулы	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2
Материал трубки	X18H10T					15XM				

Продолжение 3 табл. 1

Параметр	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
t_1', C°	320	316	325	330	326	329	317	332	313	318
t_1'', C°	292	294	297	302	304	303	280	305	290	275
$p_2, \text{МПа}$	6,4	6,5	6,0	7,4	7,5	7,0	5,5	8,0	6,0	6,5
$\alpha_1, \text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{C}^\circ)$	19	20	15	18	19	22	23	19	22	23
$\delta_{ст}, \text{мм}$	1,5	1,4	2,0	1,3	1,4	2,0	1,3	1,4	1,2	1,4

$\delta_{отл}$, мм	0,3				0,2			0,1		
Номер формулы	1	2	3	2	3	1	1	2	3	1
Материал трубки	15XM				X18H10T			15XM		

Окончание табл. 1

Параметр	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
t'_1 , C°	325	320	321	328	324	325	318	334	315	316
t''_1 , C°	292	294	297	302	304	303	280	305	290	275
p_2 , МПа	6,4	6,5	6,0	7,4	7,5	7,0	5,5	8,0	6,0	6,5
α_1 , кВт/(м ² ·C°)	16	18	15	18	19	22	16	19	20	23
$\delta_{ст}$, мм	1,4	2,0	1,3	1,4	1,4	2,0	1,3	1,4	1,2	1,4
$\delta_{отл}$, мм	0,2				0,1			0,3		
Номер формулы	3	2	1	2	3	1	1	2	3	2
Материал трубки	X18H10T						15XM			

Условные обозначения

- t'_1 - температура теплоносителя на входе ПГ, C°;
 t''_1 - температура теплоносителя на выходе ПГ, C°;
 p_2 , МПа - среднее давление рабочего тела, МПа;
 α_1 - коэффициент теплоотдачи со стороны теплоносителя, Вт/(м² C°);
 $\delta_{ст}$ - толщина стенки трубки, мм;
 $\delta_{отл}$ - толщина отложений на внутренней поверхности трубки, мм.

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ
по дисциплине “Парогенераторы АЭС”

Тема 3. Потери давления в парогенерирующем канале

Условие задачи

Поток воды поступает на вход обогреваемого вертикального парогенерирующего канала цилиндрической формы. Движение воды в канале - подъемное.

Известны длина l_k и наружный диаметр $d_{нар}$ канала, толщина $\delta_{ст}$ и абсолютная эквивалентная шероховатость его стенок $\delta_{ш}$.

Заданы давление $p_{вх}$ и недогрев воды до температуры насыщения Δt_{ex} на входе в канала, а также перегрев пара выше температуры насыщения Δt_{ne} на выходе канала.

Необходимо:

- определить массовый расход воды через канал G_k ;
- рассчитать тепловой поток, подводимый к стенкам канала q_f ;
- найти длины характерных участков канала (экономайзерного $l_э$, испарительного l_u , пароперегревательного l_{ne});
- вычислить потери давления на трение на экономайзерном $\Delta p_э$, испарительном Δp_u и пароперегревательном Δp_{ne} участках;
- рассчитать потери давления на ускорение потока $\Delta p_{уск}$ и нивелирную составляющую потерь давления $\Delta p_{нив}$;
- вычислить потери давления в канале Δp_k .

Примечания:

- **исходные данные взять по таблице 1;**
- поверхность канала рассматривать как шероховатую;
- физические характеристики и скорость воды на входе в канал определять по температуре $t_{вх}$ и давлению $p_{вх}$;
- физические характеристики в пределах экономайзерного и пароперегревательного участков определять по $p_{вх}$ и средней температуре на соответствующем участке;
- физические характеристики в пределах испарительного участка определять по $p_{вх}$ и среднему паросодержанию на участке \bar{x} ;
- при определении расхода G_k скорость циркуляции рабочего тела принять в диапазоне $w_0 = 2 \dots 5$ м/с;
- плотность теплового потока q_f считать постоянной по длине канала;
- расчет сопротивления трения для испарительного участка вести по нормативному методу ЦКТИ.

Таблица 1. Исходные данные к ИДЗ №3

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_K, \text{ м}$	9	13	10	9	10	9	10	16	14	11
$d_{нар}, \text{ м}$	15	24	20	16	24	22	20	22	20	14
$\delta_{cm}, \text{ мм}$	1	1,6	3	2	1,4	1,3	3	1,2	1,4	2
$\delta_{ш}, \text{ мм}$	0,1	0,25	0,35	0,3	0,2	0,15	0,22	0,25	0,3	0,4
$p_{вх}, \text{ МПа}$	7	11	9	7	9	7	11	9	7	7
$\Delta t_{вх}, \text{ }^\circ\text{C}$	22	25	35	25	30	25	28	35	25	30
$\Delta t_{не}, \text{ }^\circ\text{C}$	30	45	40	60	55	45	55	45	70	65

Показатель	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$l_K, \text{ м}$	9	13	10	12	11	12	13	10	12	11
$d_{нар}, \text{ м}$	18	14	20	24	21	18	14	20	24	16
$\delta_{cm}, \text{ мм}$	1	3	2	1,4	1,8	1	3	2	1,4	2
$\delta_{ш}, \text{ мм}$	0,1	0,2	0,3	0,3	0,25	0,1	0,2	0,3	0,3	0,15
$p_{вх}, \text{ МПа}$	11	9	7	7	9	7	11	9	7	7
$\Delta t_{вх}, \text{ }^\circ\text{C}$	30	35	25	30	30	25	30	35	25	30
$\Delta t_{не}, \text{ }^\circ\text{C}$	30	40	53	62	57	45	58	75	60	65

Показатель	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$l_K, \text{ м}$	8	14	9	13	10	9	10	16	15	11
$d_{нар}, \text{ м}$	15	24	15	24	24	20	16	24	22	14
$\delta_{см}, \text{ мм}$	1	2	2	2,5	1,8	1,6	3	2	1,4	2
$\delta_{ш}, \text{ мм}$	0,1	0,2	0,3	0,3	0,25	0,15	0,2	0,25	0,35	0,4
$p_{вх}, \text{ МПа}$	4	6	8	9	9	7	11	9	7	7
$\Delta t_{вх}, \text{ }^\circ\text{C}$	20	25	30	35	30	25	30	35	25	30
$\Delta t_{не}, \text{ }^\circ\text{C}$	35	45	50	60	65	45	55	75	70	65

Показатель	Вариант									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
$l_K, \text{ м}$	9	13	10	12	11	12	13	15	16	12
$d_{нар}, \text{ м}$	16	22	14	20	21	18	14	20	24	16
$\delta_{см}, \text{ мм}$	1	3	2	1,4	1,8	1,6	3	2	1,4	2
$\delta_{ш}, \text{ мм}$	0,1	0,2	0,3	0,3	0,25	0,15	0,3	0,3	0,25	0,15
$p_{вх}, \text{ МПа}$	4	6	8	9	9	7	11	9	7	7
$\Delta t_{вх}, \text{ }^\circ\text{C}$	20	25	30	35	30	25	30	35	25	30
$\Delta t_{не}, \text{ }^\circ\text{C}$	35	45	50	60	65	45	55	75	70	65

Условные обозначения

l_k	- длина канала;
$d_{нар}$	- наружный диаметр канала;
$d_{вн}$	- внутренний диаметр канала;
$\delta_{ст}$	- толщина стенок канала;
$\delta_{ш}$	- абсолютная эквивалентная шероховатость стенок канала;
$P_{вх}$	- давление на входе в канал;
$\Delta t_{вх}$	- недогрев воды до температуры насыщения на входе в канал;
$\Delta t_{не}$	- перегрев пара выше температуры насыщения на выходе канала;
G_k	- массовый расход воды через канал;
w_0	- скорость циркуляции;
q_f	- плотность теплового потока;
$l_{э}, l_u, l_{не}$	- длины характерных участков канала: экономайзерного, испарительного, пароперегревательного;
$\Delta p_{э}, \Delta p_u,$ $\Delta p_{не}$	- потери давления на трение на экономайзерном, испарительном и пароперегревательном участках;
$\Delta p_{уск}$	- потери давления на ускорение потока;
$\Delta p_{нив}$	- нивелирная составляющая потерь давления;
$\xi_{тр}$	- коэффициент трения.

Краткие методические указания к решению задачи

1. Определить температуру воды t_{ex} на входе в канал и температуру пара t_{ne} на выходе канала.
2. Найти физические параметры в характерных сечениях канала и средние для участков.
3. Рассчитать длины характерных участков канала $l_{э}$, l_u и l_{ne} .
4. Вычислить скорости среды (воды, пара) и значения критерия Рейнольдса средние для участков.
5. Определить средние коэффициенты трения ξ_{mp} для характерных участков канала.
6. Вычислить потери давления на трение на экономайзерном $\Delta p_{э}$, испарительном Δp_u и пароперегревательном Δp_{ne} участках.
7. Найти потери давления на ускорение потока $\Delta p_{уск}$ и нивелирную составляющую потерь давления $\Delta p_{нив}$.
8. Определить общие потери давления в канале Δp_k .

Вопросы для самопроверки

1. По каким признакам классифицируют двухфазные потоки?
2. Дайте определение понятию «Скорость циркуляции».
3. Дайте определение понятию «Массовое паросодержание».
4. Дайте определение понятию «Экономайзерный участок».
5. Дайте определение понятию «Испарительный участок».
6. Дайте определение понятию «Пароперегревательный участок».
7. Дайте определение понятию «Массовое паросодержание».
8. Каким образом можно установить наличие тех или иных характерных участков канала?
9. Как рассчитывают скорость смеси при движении двухфазного потока?
10. Как рассчитывают нивелирные потери давления при движении двухфазного потока?
11. Как рассчитывают потери давления на ускорение потока?
12. Как рассчитывают потери давления в местных сопротивлениях при движении двухфазного потока?
13. Как рассчитывают потери давления на трение при движении двухфазного потока (метод ЦКТИ)?

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ
по дисциплине “Парогенераторы АЭС”

Тема 4. Сепарация в ПГ насыщенного пара с погруженной поверхностью теплообмена

Варианты 1-40

Условие задачи

Парогенератор насыщенного пара горизонтальный, с погружённой поверхностью теплообмена (рис.1). В конструкции ПГ предусмотрены две ступени сепарации: объемная (гравитационная) и с помощью горизонтально расположенных пакетов жалюзийного сепаратора (ЖС).

Необходимо:

- найти приведенную скорость пара w_0'' при проходе через зеркало испарения;
- вычислить действительный уровень воды h_0 в работающем ПГ;
- рассчитать скорость пара $w_{жс}$ на входе в жалюзийный сепаратор и сравнить ее с допустимой;
- определить влажность пара Y на входе в жалюзийный сепаратор.

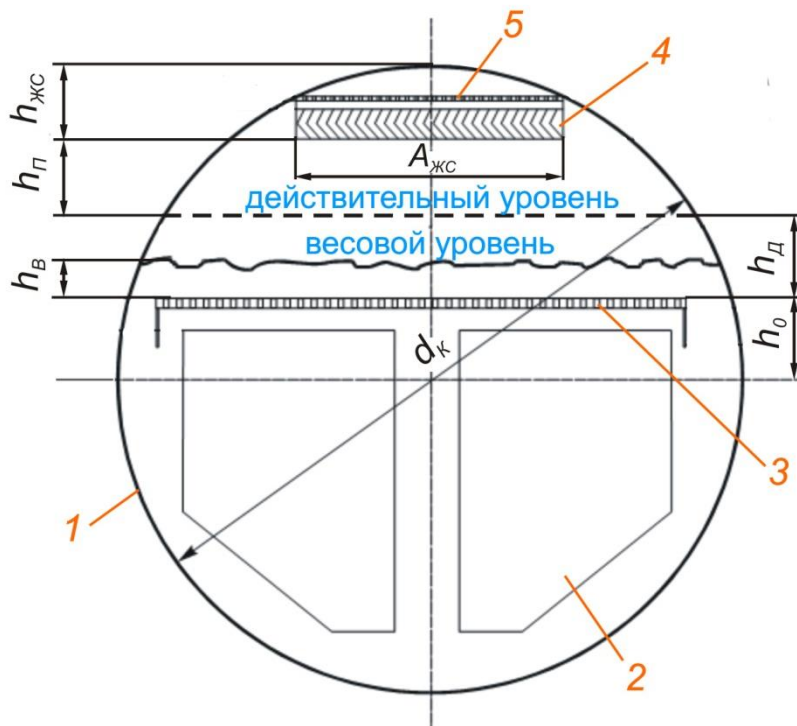


Рис.1. Принципиальная сепарационная схема горизонтального ПГ насыщенного пара с погруженной поверхностью теплообмена:

- 1- корпус ПГ; 2 – теплообменные трубки; 3 – погруженный дырчатый лист (ПДЛ); 4 – жалюзийный сепаратор (ЖС); 5 – пароприемный потолок.

d_k - внутренний диаметр корпуса парогенератора; h_0 – превышение верхнего

края погружного дырчатого листа (ПДЛ) над горизонтальной осью ПГ; h_B , h_D -
весовой и действительный уровни воды относительно ПДЛ; $h_{жсс}$ – расстояние по
вертикали от входного сечения жалюзийного сепаратора до стенки корпуса

ПГ; h_n - высота парового объема

Примечания:

- **исходные данные взять по таблице 1;**
- превышение верхнего края погружного дырчатого листа (ПДЛ) над горизонтальной осью ПГ принять равным $h_0 = 300 \dots 500$ мм.

Таблица 1. Исходные данные к ИДЗ № 4

Показатель	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
D , кг/с	600	680	120	125	155	265	410	425	390	275
p_2 , МПа	7,5	7	4,5	4,2	5,2	5,5	6,3	6,7	7,2	7,9
d_k , м	4,6	4,8	3,2	3	3,5	3,6	4,25	4,25	4,0	3,6
F_{3u} , м ²	65	76,8	35,2	30	38,5	38,5	56	54	48	37
$L_{жс}$, м	15	16	11	10	13	11	11	14	12	11
$h_{жс}$, м	0,5	0,45	0,4	0,4	0,5	0,53	0,5	0,5	0,42	0,4
h_6 , м	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,45	0,5	0,52	0,5	0,45

Показатель	Вариант									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
D , кг/с	520	710	130	125	160	250	405	155	275	390
p_2 , МПа	7,5	6,5	6,1	7,1	5,5	5,4	6,5	6,9	7,2	8,2
d_k , м	4,6	4,7	3,5	3,2	3,6	3,6	4,3	4,5	4,2	3,9
F_{3u} , м ²	67,5	76,0	35,5	34	33,5	39,5	75,5	38,2	33	36
$L_{жс}$, м	17	15	12	11	13	12	13	14	10	11
$h_{жс}$, м	0,45	0,45	0,5	0,5	0,5	0,55	0,5	0,48	0,43	0,44
h_6 , м	0,45	0,35	0,35	0,4	0,34	0,54	0,35	0,4	0,34	0,45

Показатель	Вариант									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
D , кг/с	614	700	125	115	150	270	400	420	400	270
p_2 , МПа	7,8	7	4,6	4	5	5,5	6,3	6,7	7	8
d_k , м	4,5	4,8	3,2	3	3,5	3,5	4,25	4,25	4,0	3,7
F_{3u} , м ²	67,5	76,8	35,2	30	38,5	38,5	54	54	48	37
$L_{жс}$, м	15	16	11	10	11	11	12	13	11	10
$h_{жс}$, м	0,5	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
h_6 , м	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4

Показатель	Вариант									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
D , кг/с	500	700	135	115	150	260	400	150	270	400
p_2 , МПа	7,5	6,3	6,7	7	5	5,5	6,3	6,7	7	8
d_k , м	4,5	4,8	3,2	3	3,5	3,5	4,25	4,25	4,0	3,7
F_{3u} , м ²	67,5	76,8	35,2	30	38,5	38,5	76,8	35,2	30	37
$L_{жс}$, м	15	16	11	10	11	11	12	13	11	10
$h_{жс}$, м	0,5	0,5	0,4	0,4	0,55	0,5	0,55	0,45	0,4	0,4
h_6 , м	0,35	0,45	0,45	0,4	0,34	0,54	0,45	0,35	0,35	0,45

Условные обозначения

D	- паропроизводительность;
p_2 , МПа	- давление рабочего тела;
d_k , м	- - внутренний диаметр корпуса парогенератора;
$F_{зи}$, м ²	- площадь зеркала испарения;
$L_{жс}$, м	- длина жалюзийного сепаратора;
$h_{жс}$, м	- расстояние по вертикали от входного сечения ЖС до стенки корпуса ПГ;
h_B, h_δ	- весовой и действительный уровни воды относительно ПДЛ;
h_0	- превышение верхнего края погружного дырчатого листа (ПДЛ) над горизонтальной осью ПГ;
h_n	- высота парового объема;
w_0''	- приведенная скорость пара при проходе через зеркало испарения;
ρ'', ρ'	- плотность сухого насыщенного пара и кипящей воды при давлении p_2 ;
Φ_δ	- истинное объемное паросодержание при барботаже пара через слой воды;
$F_{ндл}$	- площадь погружного дырчатого листа;
$A_{жс}$	- ширина жалюзийного сепаратора;
$w_{жс}''$	- скорость пара на входе в жалюзийный сепаратор;
$h_{н.кр}$	- критическое значение высоты парового объема;
Y	- влажность пара.

Необходимые теоретические сведения

Цель расчета осадительной (объемной, осадительной) сепарации заключается в определении приведенной скорости пара при проходе через зеркало испарения, действительного уровня воды в работающем ПГ и влажности пара на входе в жалюзийный сепаратор или пароотводящие трубы при отсутствии ЖС. Ниже приводится алгоритм такого расчета.

Приведенная скорость пара при проходе через ЗИ

Вычислить приведенную скорость пара при проходе через зеркало испарения

$$w_0'' = \frac{D}{\rho'' \cdot F_{зи}}$$

где $F_{зи}$ - площадь зеркала испарения ПГ, м². Для парогенераторов с погруженным дырчатым листом $F_{зи} = F_{ndl}$; для ПГ без дырчатого листа $F_{зи}$ принимают равной площади воды над верхним рядом пучка труб.

D - паропроизводительность ПГ, кг/с;

ρ'' - плотность сухого насыщенного пара при давлении p_2 , кг/м³.

Действительный уровень воды в ПГ

Найти истинное объемное паросодержание при барботаже пара через слой воды

$$\varphi_{\delta} = \frac{w_0''}{w_0'' + (0,65 - 0,039 \cdot p_2)}$$

Определить действительный (с учетом вспухания) уровень воды в ПГ, м

$$h_{\delta} = \frac{h_g}{1 - \varphi_{\delta}}$$

где h_g – весовой уровень воды над ПДЛ, при отсутствии последнего – над последним рядом труб, м (см. рис.1).

Скорость пара на входе в жалюзийный сепаратор

Рассчитать ширину жалюзийного сепаратора (рис. 1)

$$A_{жс} \approx 2 \cdot \sqrt{d_k \cdot h_{жс} - h_{жс}^2}$$

где d_k - диаметр корпуса ПГ, м;

$h_{жс}$ – расстояние по вертикали от входного сечения жалюзийного сепаратора до стенки корпуса ПГ, м.

Вычислить площадь ЖС

$$F_{жс} = A_{жс} \cdot L_{жс}$$

где $L_{жс}$ - длина ЖС, м.

Найти скорость пара на входе в жалюзийный сепаратор

$$w''_{жс} = \frac{D}{\rho'' \cdot F_{жс}}$$

Определить предельную (максимально допустимую) скорость пара на входе в жалюзийный сепаратор по графику на рис. 2 или с помощью аппроксимационного выражения типа

$$w''_{np} = 0,837 - 0,09433 \cdot p_2 + 3,169 \cdot 10^{-3} \cdot p_2^2,$$

где p_2 в МПа.

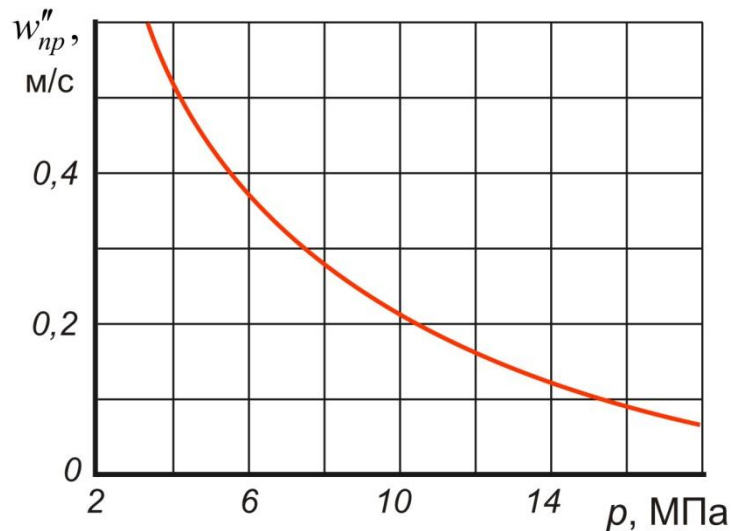


Рис. 2. Предельные скорости пара перед горизонтальными жалюзийными сепараторами

Если найденная ранее скорость $w''_{жс}$ превышает предельную w''_{np} , то необходимо отметить возможно неэффективную работу ЖС.

Влажность пара на входе в жалюзийный сепаратор

Вычислить высоту парового объема (рис. 1), м

$$h_n = 0,5 \cdot d_k - h_0 - h_d - h_{жс}.$$

Рассчитать критическое значение высоты парового объема, м

$$h_{n.кр} = 0,087 \cdot [w''_0 \cdot F(p)]^{1,3},$$

где $F(p) = 3,45 \cdot 10^3 \cdot \left[\frac{\rho'' \cdot (\rho')^2}{(\rho' - \rho'')^6} \right]^{0,25}$ - параметр, учитывающий влияние давления

на процесс гравитационной сепарации.

Определить влажность пара перед пароприемным устройством (ЖС).

Если $h_n > h_{n.кр}$, то влажность пара может быть рассчитана по формуле ВТИ

$$Y = M \cdot 10^{-4} \cdot \frac{(w_0'')^{2,76}}{h_n^{2,3}},$$

где M – коэффициент, зависящий от давления пара в парогенераторе. Определяется с помощью аппроксимационного выражения типа

$$M = 2,05 - 3,049 \cdot p_2 + 0,9614 \cdot p_2^2,$$

где p_2 в МПа.

Если $h_n \leq h_{n.кр}$, то влажность пара следует определять по формуле вида

$$Y = Y_{кр} \cdot \left(\frac{h_{n.кр}}{h_n} \right)^N,$$

где $Y_{кр} = 0,02 \dots 0,04$ – влажность пара, соответствующая $h_{n.кр}$.

N – показатель степени, характеризующий скорость увеличения влажности с уменьшением высоты парового объема. Для горизонтальных ПГ АЭС с ВВЭР показатель N зависит от отношения площади зеркала испарения $F_{зи}$ к площади пароприемных устройств $F_{мпу}$ (в нашем случае площади жалюзийного сепаратора):

- при $F_{зи} / F_{жсс} = 1$ показатель $N = 6$;
- при $F_{зи} / F_{жсс} = 1,6$ показатель $N = 9$;
- при $F_{зи} / F_{жсс} = 2 \dots 2,5$ показатель $N = 12 \dots 16$.

Для определения показателя N можно воспользоваться уравнением вида

$$N = 3,323 + 1,0227 \cdot (F_{зи} / F_{жсс}) + 1,6254 \cdot (F_{зи} / F_{жсс})^2.$$

Найденная таким образом влажность Y не должно превышать предельно допустимого значения с точки зрения эффективной работы жалюзийного сепаратора $Y_{np} = 2,5 \dots 3,0$ %.

Если найденная влажность Y превышает предельную Y_{np} , то необходимо отметить возможно неэффективную работу ЖС.

Если найденное значение влажности Y оказалось меньше 0,2 %, то теоретически необходимости в установке сепараторов нет, но практически, учитывая вероятные «перекосы» уровня из-за неравномерности нагрузки зеркала испарения, необходимость в установке сепараторов существует всегда.

Краткие методические указания к решению задачи

1. Определить температуру по давлению все необходимые физические параметры (ρ'' , ρ') и коэффициенты ($F(p)$, M).
2. Вычислить приведенную скорость пара w_0'' при проходе через ЗИ.

3. Найти истинное объемное паросодержание φ_{δ} и действительный уровень воды h_{δ} в парогенераторе.
4. Вычислить площадь жалюзийного сепаратора $F_{жс}$ и найти скорость пара $w''_{жс}$ на входе в него.
5. Определить высоту парового объема h_n и его критическую высоту $h_{n.кр}$.
6. Найти влажность пара Y перед пароприемным устройством.
7. Проанализировать полученные результаты.

Вопросы для самопроверки

1. Обоснуйте необходимость сепарации в парогенераторах АЭС.
2. Назовите значение предельно допустимой влажности пара для ПГ насыщенного пара с ЕЦ.
3. Каково назначение сепарационного барабана и его основных элементов.
4. Дайте определение понятию «Сепарация пара».
5. Какие способы сепарации пара используются в ПГ АЭС?
6. Объясните механизм осушения пара при гравитационной сепарации.
7. Перечислите факторы, определяющие эффективность гравитационной сепарации.
8. Каково назначение погруженного дырчатого листа (щита).
9. Каково назначение пароприемного потолка.
10. Объясните принцип действия жалюзийного сепаратора.
11. Укажите факторы, определяющие эффективность жалюзийного сепаратора.
12. Дайте определение понятию «Зеркало испарения».