

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»**

ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

Кафедра теплосиловых установок и тепловых двигателей

**ПАРОТУРБИННЫЕ УСТАНОВКИ
ТЕПЛОВЫХ И АТОМНЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**РАСЧЕТ ДИАФРАГМЫ КОНДЕНСАЦИОННОЙ
ТУРБИНЫ НА ПРОЧНОСТЬ**

**Методические указания
к выполнению расчетной работы № 2**

**Санкт-Петербург
2018**

УДК 621.43(075)

Паротурбинные установки тепловых и атомных электростанций. Расчет диафрагмы конденсационной турбины на прочность: методические указания к выполнению расчетной работы № 2/ сост. П.Н. Коновалов, М.С. Липатов; ВШТЭ СПбГУПТД.- СПб., 2018. - 11 с.

В методических указаниях приводятся исходные данные, алгоритм и результаты расчета на прочность диафрагмы конденсационной турбины, включающей паровую турбину типа «К-800-240», определяются напряжение в теле диафрагмы и максимальный прогиб диафрагмы. Значения полученных величин сравниваются с допустимыми и делается вывод о возможности эксплуатации турбины.

Методические указания предназначены для студентов ИЭиА, обучающихся по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», профилю: «Технология производства электрической и тепловой энергии».

Рецензент: зав. кафедрой промышленной теплоэнергетики ВШТЭ СПбГУПТД, канд. тех. наук доцент С.Н. Смородин.

Подготовлены и рекомендованы к печати кафедрой теплосиловых установок и тепловых двигателей ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 6 от 23.05.2018).

Утверждены к изданию методической комиссией института энергетики и автоматизации ВШТЭ СПбГУПТД (протокол № 7 от 07.06.2018).

Общие положения

Расчет диафрагмы конденсационной турбины на прочность базируется на знаниях, полученных студентами при изучении промышленных ТЭС и ТЭЦ, теории паровых турбин и ПТУ в рамках дисциплин: «Промышленные ТЭЦ», «Нагнетатели и тепловые двигатели», «Паротурбинные установки тепловых и атомных электростанций». Расчет может производиться с использованием компьютерной техники (программ Excel, Mathcad и др.), а также калькулятора.

Целью расчета диафрагмы конденсационной турбины на прочность является определение напряжения в теле диафрагмы, ее максимального прогиба и по указанным величинам оценка возможности эксплуатации паровой турбины при удалении ее последних ступеней.

Объектом исследования является цилиндр низкого давления (ЦНД), включающий пять ступеней (21, 22, 23, 24, 25) паровой конденсационной турбины К-800-240. В процессе длительной эксплуатации произошло эрозионное разрушение последних двух ступеней (24,25) ЦНД, которые при очередном ремонте были удалены.

Алгоритм расчета диафрагмы конденсационной турбины на прочность

Точный расчет диафрагмы является весьма сложным и трудоемким. Ориентировочно напряжения в теле диафрагмы и ее максимальный прогиб могут быть определены по методу А.М. Валя. При этом диафрагма рассматривается как сплошное полукольцо, опертое по наружному диаметру и находящееся под действием равномерно распределенной нагрузки. Усилия, действующие на диафрагму, определяются перепадом давлений Δp :

$$\Delta p = p_0 - p_1 ,$$

где p_0 – давление пара перед ступенью, p_1 – давление пара за сопловой решеткой.

Допускаемое напряжение в диафрагмах $\sigma_{\text{доп}}$ не должно превышать 65 МПа, модуль упругости $E=200000$ МПа, осевые зазоры между телом диафрагмы и диском $\delta_a=0,9$ см, давление за последней (25-ой) ступенью $p_z=0,0034$ МПа, наибольший прогиб диафрагмы не должен превышать $1/3 \delta_a$.

Расчет диафрагмы конденсационной турбины на прочность выполняется студентами по исходным данным, которые приведены в табл. 1. Следующие величины: средняя толщина диафрагмы ступеней, $\delta_{\text{ср}}$; степень реактивности 23-й ступени, ρ - после удаления 24-й и 25-й ступеней - выдаются студенту преподавателем в соответствии с вариантом.

Алгоритм расчета диафрагмы конденсационной турбины на прочность показан в табл. 2.

Таблица 1.

Исходные данные

Наименование и обозначение величины	Значение		
	ступень 23	ступень 24	ступень 25
Начальное давление, начальная температура, p_0 , МПа, t_0 , °С	0,082 106 0,054	0,0361 - 0,025	0,0146 - 0,0098
Давление за сопловой решеткой, p_1 , МПа	201,3	222,0	253,0
Средний диаметр диафрагмы, D , см	40,5	61,0	92,0
Длина сопловой лопатки, l_1 , см	98,0	98,0	98,0
Внутренний диаметр диафрагмы, $d_{вн}$, см			
Средняя толщина диафрагмы, $\delta_{ср}$, см	по варианту	по варианту	по варианту
Полный располагаемый теплоперепад в ступени, $h_{от}^*$, $\frac{кДж}{кг}$	125,0	130,0	203,0
Степень реактивности ступени после удаления 24,25, ρ	по варианту	-	-

Таблица 2.

Алгоритм расчета

Наименование величины	Способ определения	Размер- ность
Наружный диаметр диафрагмы, D_H	$D_H = D + l_1$	см
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы, Δp	$\Delta p = p_0 - p_1$	МПа
Коэффициент k_σ	$k_\sigma = 833 \times \left(1 - \frac{d_{вн}}{D_H}\right)$	-
Напряжение в теле диафрагмы, σ	$\sigma = \frac{k_\sigma}{10} \times \left(0,1 \times \frac{D_H}{\delta_{ср}}\right)^2 \cdot \Delta p$	МПа
Сравнение величин σ и $\sigma_{доп}$	$\sigma \geq \leq \sigma_{доп}$	МПа
Коэффициент k_Δ , зависящий от $\frac{d_{вн}}{D_H}$ и от $\frac{\delta_{ср}}{D_H}$	по графику	-
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ	$\Delta = k_\Delta \cdot \frac{\Delta p}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_H}{\delta_{ср}}\right)^3 \cdot D_H$	см
Сравнение величин Δ и $\left(\frac{1}{3} \cdot \delta_a\right)$	$\Delta \geq \leq \left(\frac{1}{3} \cdot \delta_a\right)$	см

Наименование величины	Способ определения	Размерность
Выполнение расчетов диафрагм других ступеней (24, 25)		
Определение параметров пара и теплоперепада в 23-й ступени после удаления 24-й и 25-й		
Полный располагаемый теплоперепад в 23-й ступени после удаления двух ступеней, H_{23}^*	$H_{23}^* = h_{023}^* + h_{024}^* + h_{025}^*$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Энтальпия пара перед 23-й ступенью, h_{23}^*	определяется по p_0, t_0	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Полный располагаемый теплоперепад в сопловом аппарате 23-й ступени, h_{c23}^*	$h_{c23}^* = (1 - \rho) \cdot H_{23}^*$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Энтальпия пара после соплового аппарата 23-й ступени, h_{123}	$h_{123} = h_{23}^* - h_{c23}^*$	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$
Давление пара за сопловой решеткой 23-й ступени после удаления 24-й и 25-й ступеней, p_{1a}	определяется по энтальпии пара h_{123} и энтропии s_{023}	МПа
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы 23-й ступени, Δp_a	$\Delta p_a = p_{023} - p_{1a}$	МПа
Напряжение в теле диафрагмы 23-й ступени после удаления двух ступеней, σ_a	$\sigma_a = \frac{k_\sigma}{10} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_H}{\delta_{cp}}\right)^2 \cdot \Delta p_a$	МПа
Сравнение величин σ_a и $\sigma_{доп}$	$\sigma_a \geq \leq \sigma_{доп}$	МПа
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ_a	$\Delta_a = k_\Delta \cdot \frac{\Delta p_a}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_H}{\delta_{cp}}\right)^3 \cdot D_H$	см
Сравнение величин Δ_a и $\left(1/3 \cdot \delta_a\right)$	$\Delta_a \geq \leq \left(1/3 \cdot \delta_a\right)$	см

По результатам сравнения величин σ_a и $\sigma_{доп}$, также Δ_a и $\left(1/3 \cdot \delta_a\right)$ можно сделать вывод о возможности эксплуатации паровой турбины при удалении двух последних ступеней (24, 25).

Пример расчета диафрагмы показан далее в табл. 3, 4.

Таблица 3.

Исходные данные

Наименование и обозначение величины	Значение		
	ступень 23	ступень 24	ступень 25
Начальные показатели давления, температуры, p_0 , МПа, t_0 , °С	0,082 106 0,054	0,0361 - 0,025	0,0146 - 0,0098
Давление за сопловой решеткой, p_1 , МПа	201,3	222,0	253,0
Средний диаметр диафрагмы, D , см	40,5	61,0	92,0
Длина сопловой лопатки, l_1 , см	98,0	98,0	98,0
Внутренний диаметр диафрагмы, $d_{вн}$, см			
Средняя толщина диафрагмы, $\delta_{ср}$, см	11,1	14,0	20,0
Полный располагаемый теплоперепад в ступени, $h_{от}^*$, $\frac{кДж}{кг}$	125,0	130,0	203,0
Степень реактивности ступени после удаления 24,25, ρ	0,45	-	-

Таблица 4.

Алгоритм и результаты расчета

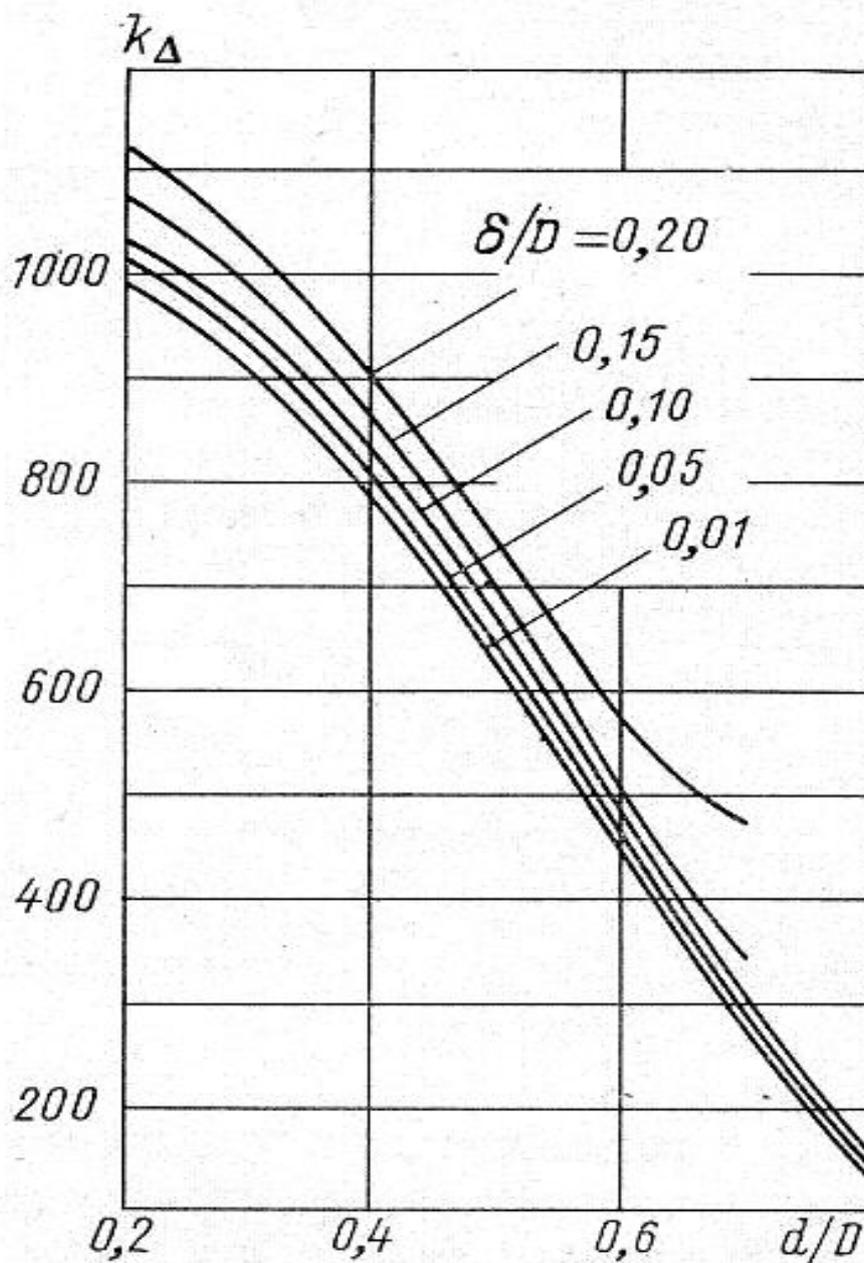
Наименование величины	Расчетная формула	Результат расчета	Единица измерения
23-я ступень			
Наружный диаметр диафрагмы, D_n	$D_n = D + l_1 = 201,3 + 40,5$	241,8	см
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы, Δp	$\Delta p = p_0 - p_1 = 0,082 - 0,054$	0,028	МПа
Коэффициент, k_σ	$k_\sigma = 833 \cdot \left(1 - \frac{d_{вн}}{D_n}\right) = 833 \cdot \left(1 - \frac{98,0}{241,8}\right)$	496,4	-

Наименование величины	Расчетная формула	Результат расчета	Единица измерения
Напряжение в теле диафрагмы, σ	$\sigma = \frac{k_{\sigma}}{10} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}}\right)^2 \cdot \Delta p = \frac{496,4}{10} \times$ $\times \left(0,1 \cdot \frac{241,8}{11,1}\right)^2 \cdot 0,028$	6,596	МПа
Сравнение величин σ с $\sigma_{дон}$	$\sigma \leq \sigma_{дон}$	$\sigma < \sigma_{дон}$	МПа
Коэффициент, k_{Δ}	По графику на рис.	655	-
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ	$\Delta = k_{\Delta} \cdot \frac{\Delta p}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}}\right)^3 \cdot D_n =$ $= 655 \cdot \frac{0,028}{200000} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{241,8}{11,1}\right)^3 \cdot 241,8$	0,230	см
Сравнение величин Δ и $(1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta \leq (1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta < (1/3 \cdot \delta_a)$	см
24 ступень			
Наружный диаметр диафрагмы, D_n	$D_n = D + l_1 = 222,0 + 61,0$	283	см
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы, Δp	$\Delta p = p_0 - p_1 = 0,0361 - 0,025$	0,0111	МПа
Коэффициент, k_{σ}	$k_{\sigma} = 833 \cdot \left(1 - \frac{d_{вн}}{D_n}\right) = 833 \cdot \left(1 - \frac{98,0}{283}\right)$	544,5	-
Напряжение в теле диафрагмы, σ	$\sigma = \frac{k_{\sigma}}{10} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}}\right)^2 \cdot \Delta p = \frac{544,5}{10} \times$ $\times \left(0,1 \cdot \frac{283}{14,0}\right)^2 \cdot 0,0111$	2,47	МПа
Сравнение величин σ с $\sigma_{дон}$	$\sigma \leq \sigma_{дон}$	$\sigma < \sigma_{дон}$	МПа
Коэффициент, k_{Δ}	по графику	650	-

Наименование величины	Расчетная формула	Результат расчета	Единица измерения
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ	$\Delta = k_{\Delta} \cdot \frac{\Delta p}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}} \right)^3 \cdot D_n =$ $= 650 \cdot \frac{0,0111}{200000} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{283}{14,0} \right)^3 \cdot 283$	0,084	см
Сравнение величин Δ и $(1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta \geq (1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta < (1/3 \cdot \delta_a)$	см
25 ступень Наружный диаметр диафрагмы, D_n	$D_n = D + l_1 = 253,0 + 92,0$	345	см
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы, Δp	$\Delta p = p_0 - p_1 = 0,0146 - 0,0098$	0,0048	МПа
Коэффициент, k_{σ}	$k_{\sigma} = 833 \cdot \left(1 - \frac{d_{en}}{D_n} \right) = 833 \cdot \left(1 - \frac{98,0}{345} \right)$	596,4	-
Напряжение в теле диафрагмы, σ	$\sigma = \frac{k_{\sigma}}{10} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}} \right)^2 \cdot \Delta p = \frac{596,4}{10} \times$ $\times \left(0,1 \cdot \frac{345}{20,0} \right)^2 \cdot 0,0048$	0,85	МПа
Сравнение величин σ с $\sigma_{дон}$	$\sigma \geq \sigma_{дон}$	$\sigma < \sigma_{дон}$	МПа
Коэффициент, k_{Δ}	по графику	820	-
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ	$\Delta = k_{\Delta} \cdot \frac{\Delta p}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}} \right)^3 \cdot D_n =$ $= 820 \cdot \frac{0,0048}{200000} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{345}{20,0} \right)^3 \cdot 345$	0,035	см
Сравнение величин Δ и $(1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta \geq (1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta < (1/3 \cdot \delta_a)$	см

Наименование величины	Расчетная формула	Результат расчета	Единица измерения
Определение параметров пара и теплоперепада в 23 ступени после удаления 24 и 25-й			
Полный располагаемый теплоперепад в ступени, H_{23}^*	$H_{23}^* = h_{023}^* + h_{024}^* + h_{025}^* = 125,0 + 130,0 + 203,0$	458	кДж/кг
Энтальпия пара перед 23-й ступенью, h_{23}^*	определяется по p_0, t_0	2691	кДж/кг
Полный располагаемый теплоперепад в сопловом аппарате 23-й ступени, h_{c23}^*	$h_{c23}^* = (1 - \rho) \cdot H_{23}^* = (1 - 0,45) \cdot 458$	251,9	кДж/кг
Энтальпия пара после соплового аппарата 23-й ступени, h_{123}	$h_{123} = h_{23}^* - h_{c23}^* = 2691 - 251,9$	2439,1	кДж/кг
Давление пара за сопловой решеткой 23-й ступени, p_{1a}	определяется по энтальпии пара h_{123} и энтропии s_{023}	0,01612	МПа
Разность давлений, действующих по обе стороны диафрагмы 23-й ступени, Δp_a	$\Delta p_a = p_{023} - p_{1a} = 0,082 - 0,01612$	0,06588	МПа
Напряжение в теле диафрагмы 23-й ступени, σ_a	$\sigma = \frac{k_\sigma}{10} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_u}{\delta_{cp}} \right)^2 \cdot \Delta p_a = \frac{496,4}{10} \times$ $\times \left(0,1 \cdot \frac{241,8}{11,1} \right)^2 \cdot 0,06588$	15,52	МПа
Сравнение величин σ_a с $\sigma_{дон}$	$\sigma_a \geq \leq \sigma_{дон}$	$\sigma_a < \sigma_{дон}$	МПа

Наименование величины	Расчетная формула	Результат расчета	Единица измерения
Максимальный прогиб диафрагмы, Δ_a	$\Delta = k_{\Delta} \cdot \frac{\Delta p_a}{E} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{D_n}{\delta_{cp}}\right)^3 \cdot D_n =$ $= 655 \cdot \frac{0,06588}{200000} \cdot \left(0,1 \cdot \frac{241,8}{11,1}\right)^3 \cdot 241,8$	0,54	см
Сравнение величин Δ_a и $(1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta_a \geq (1/3 \cdot \delta_a)$	$\Delta_a > (1/3 \cdot \delta_a)$	см

График для определения коэффициента k_{Δ}

Отчет должен содержать:

1. Исходные данные, алгоритмы и результаты расчета диафрагмы конденсационной турбины на прочность до и после удаления двух последних ступеней.
2. График для определения коэффициента k_{Δ} .
3. Выводы по работе.

Библиографический список

1. Щинников П.А. Проектирование одноцилиндровой конденсационной турбины: учебное пособие/ П.А. Щинников;- Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2013.-83 с.
2. Коновалов, П.Н. Нагнетатели и тепловые двигатели. Тепловой расчет паровой многоступенчатой противодавленческой турбины: учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы/ П. Н. Коновалов, А.А. Верхованцев, М.С. Липатов. - СПб.: ВШТЭ СПбГУПТД, 2018. – 68 с.

Редактор и корректор В. А. Басова
Техн. редактор Л.Я. Титова

Темплан 2018 г., поз. 61

Подп. к печати 14.03.2018.	Формат 60x84/16.	Бумага тип. № 1.
Печать офсетная.	Объем 0,75 печ.л; 0,75 уч.-изд.л.	Тираж 50 экз.
Изд. № 61. Цена "С" . Заказ №		

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.