

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

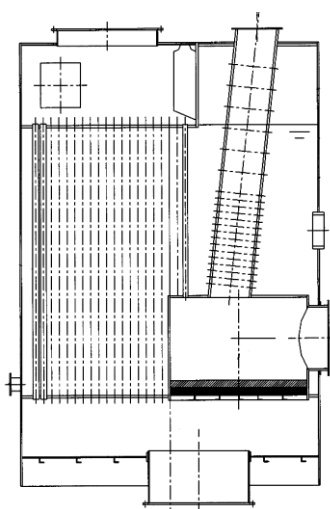
Кафедра «Энергоустановки морских судов и сооружений»

В.А. Очеретяный

РАСЧЕТ СУДОВОГО ПАРОВОГО УТИЛИЗАЦИОННОГО ГАЗОРУБНОГО КОТЛА.

Рабочая тетрадь

Учебно-методическое пособие
к выполнению курсового проекта по дисциплине
«Судовые котельные и паропроизводящие установки»



Севастополь
СевГУ
2024

УДК [621.181:629.5](075.8)

ББК 39.455.11я73

О-95

Р е ц е н з е н т :

Е.В. Хромов - канд. техн. наук, доцент кафедры ЭМСС
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

Очеретяный, В.А.

О-95 Расчет судового парового утилизационного газотрубного котла. Рабочая тетрадь : учебно-методическое пособие к выполнению курсового проекта по дисциплине «Судовые котельные и паропроизводящие установки» / В. А. Очеретяный ; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Энергоустановки морских судов и сооружений». – Севастополь : СевГУ, 2024. – 24 с. : ил. – Текст : электронный.

Рассматриваются выполненные в форме рабочей тетради рекомендации для обучающихся при тепловом, аэродинамическом и прочностном расчетах судового парового утилизационного газотрубного котла при изучении курсов «Судовые котельные и паропроизводящие установки», «Паровые котлы и установки».

Пособие предназначено для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» и 26.05.02 "Проектирование, изготовление и ремонт энергетических установок" и систем автоматизации кораблей и судов".

УДК [621.181:629.5](075.8)

ББК 39.455.11я73

Рассмотрено и рекомендовано на заседании кафедры "Энергоустановки морских судов и сооружений" в качестве учебно-методического пособия при выполнении курсового проекта по дисциплинам «Судовые котельные и паропроизводящие установки» и «Паровые котлы и установки» для студентов очной и заочной форм обучения направлений подготовки 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» и 26.05.02 «Проектирование, изготовление и ремонт энергетических установок и систем автоматизации кораблей и судов», протокол заседания № 6 от 02 февраля 2024 г.

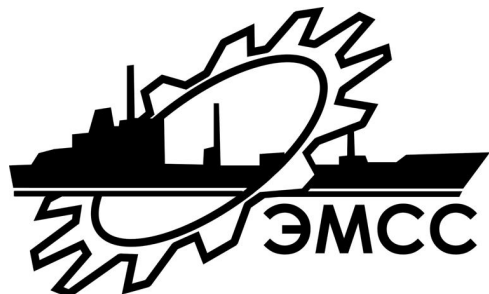
В авторской редакции

Изд. № 12/2024. Объем 1,5 п.л. Усл. печ. л. 1,39. Уч.-изд. л. 1,47.

Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»

© Очеретяный В.А., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Морской институт
Кафедра Энергоустановки
морских судов и сооружений
26.05.06
Эксплуатация
судовых энергетических установок

КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

по дисциплине

«Судовые котельные и паропроизводящие установки»
на тему Конструктивный расчет судового парового котла
типа _____, утилизационная часть

Выполнил: обучающийся
группы ЭУ/с– _____

(инициалы, фамилия)

«_____» _____ 202__ г.

Научный руководитель:

(инициалы, фамилия)

«_____» _____ 202__ г.

Оценка: _____

«_____» _____ 202__ г.

Севастополь
202__

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО “Севастопольский государственный университет”
Морской институт

Кафедра Энергоустановки морских судов и сооружений
 Дисциплина Судовые котельные и паропроизводящие установки
 Специальность Эксплуатация судовых энергетических установок
 Курс _____ Группа _____ Семестр _____

ЗАДАНИЕ

на курсовой проект обучающегося

(фамилия, имя, отчество)

1. Тема проекта Конструктивный (проверочный) расчет судового парового котла
утилизационная часть

2. Срок сдачи обучающимся выполненного проекта _____

3. Исходные данные к проекту:

№	Параметр	Размерность	Обозначение	Значение
1	Паропроизводительность	т/ч	D	
	– в т.ч. насыщенный пар	т/ч	$D_{НП}$	
	– в т.ч. перегретый пар	т/ч	$D_{ПП}$	
2	Давление пара в паро-водяном коллекторе	МПа	p_k	
3	Температура перегретого пара	°С	t_{nn}	
4	Температура питательной воды	°С	t_{nw}	
5	ДВС	–	–	
6	Мощность ДВС	кВт	N_E	
7	Удельный расход топлива	кг/(кВт·ч)	b_E	
8	Температура газов на входе в котел	°С	ϑ_{BX}	
9	Массовый расход газов	кг/ч	G_G	
10	Марка топлива	–	–	

4. Содержание расчетно-пояснительной записки (перечень вопросов, которые подлежат разработке)

Введение. 1. Описание котла-прототипа; 2. Тепловой расчет котла; 3. Аэродинамический расчет котла; 4. Прочностной расчет котла

5. Перечень графического материала

1. Поперечный разрез котла (формат А1)

6. Дата выдачи задания _____

КАЛЕНДАРНЫЙ ПЛАН

[illegible]

Обучающийся _____
(ФИО)

(ПОДПИСЬ)

Руководитель курсового проекта _____
(ФИО, должность)

(ПОДПИСЬ)

« » 202 Г.

СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
1. Введение. Описание конструкции котла-прототипа	6
2. Тепловой расчет котла	8
2.1 Определение суммарного коэффициента избытка воздуха	8
2.2 Определение зависимости энтальпии от температуры	9
2.3 Определение (назначение) теплофизических параметров пароводяного тракта.....	13
2.4 Расчет испарительного пучка	14
3. Аэродинамический расчет котла	19
4. Прочностной расчет котла	20
Библиографический список	24
Приложения (чертежи)	
Поперечный разрез котла. Ф – А1	

1. ВВЕДЕНИЕ. ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ КОТЛА-ПРОТОТИПА

Пояснительная записка содержит четыре основных раздела, отражающих типовые расчеты судового парового котла: теплового, аэродинамического, прочностного расчетов и расчета водного режима.

Цель теплового расчета котла – определение конструктивных параметров котла и его трубных пучков (поверхности нагрева), определение параметров теплового процесса, протекающего в котле (температуру, энтальпию, скорость продуктов сгорания, и др., обеспечивающих заданную паропроизводительность и КПД.

Целью аэродинамического расчета является определение газоздушного сопротивления котла и подбор вентилятора, обеспечивающего котел необходимым количеством воздуха.

Целью прочностного расчета является определение толщин элементов котла (толщина стенки трубки и стенки коллектора) при нагрузках, действующих на эти элементы при работе котла.

Описание котла сформировано на основании [1–4].

**Описание
конструкции
и работы
котла
прототипа
Устройство
котла
прототипа
(рисунок,
фото и т.п.)**

2. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ КОТЛА

2.1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ СУММАРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИЗБЫТКА ВОЗДУХА

В этом разделе на основании изучения исходных данных по котлу и ДВС, конструкции котла-прототипа, сорта топлива рассчитан суммарный коэффициент избытка воздуха и расходные характеристики газового тракта.

Таблица 2.1 – Расчет коэффициента избытка воздуха

№	Определяемый параметр, формула	Обозн.	Разм.	Значение
1	1. Теоретический объем сухого воздуха, необходимый для полного сгорания одного килограмма топлива, м ³ /кг (расчет можно выполнить с применением [8]. Для выполнения расчета выбирается марка топлива, при необходимости корректируется элементарный состав топлива, влагосодержание воздуха, коэффициент избытка воздуха в камере сгорания ДВС принимается равным 1.0): $V_O = 0,0889 \cdot (C_p + 0,375 \cdot S_p) + 0,267 \cdot H_p - 0,033 \cdot O_p =$	V_O	м ³ /кг	
2	Плотность сухого воздуха при нормальных условиях, $\rho =$	ρ	кг/м ³	
3	Суммарный коэффициент избытка воздуха утилизационного котла, [5–7]: $\alpha_\Sigma = \frac{G_\Gamma - b_E \cdot N_E}{b_E \cdot N_E \cdot V_O \cdot \rho} =$	α	-	
4	Часовой массовый расход топлива ДВС, $b_E^{\text{ч}} = b_E \cdot N_E =$	$b_E^{\text{ч}}$	кг/ч	
5	Секундный массовый расход топлива ДВС, $b_E^{\text{с}} = \frac{b_E \cdot N_E}{3600} =$	$b_E^{\text{с}}$	кг/с	
6	Секундный массовый расход газов через утилизационный котел,	$G_\Gamma^{\text{с}}$	кг/с	

	$G_{\Gamma}^C = \frac{G_{\Gamma}}{3600} =$			
7	Массовый расход газов на 1 кг топлива, $G_{\Gamma}^T = \frac{G_{\Gamma}^C}{b_E^C} =$	G_{Γ}^T	кг/кг	
8	Массовая плотность газов при нормальных условиях, $\rho_{\Gamma}^{HY} =$	ρ_{Γ}^{HY}	кг/м ³	
9	Массовая плотность газов при заданной температуре, $\rho_{\Gamma}^t = \frac{\rho_{\Gamma}^{HY} \cdot 273}{\vartheta_{BX} + 273} =$	ρ_{Γ}^t	кг/м ³	
10	Секундный объемный расход газов, $G_{\Gamma}^{C-o} = \frac{G_{\Gamma}^C}{\rho_{\Gamma}^t} =$	G_{Γ}^{C-o}	м ³ /с	

2.2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ЭНТАЛЬПИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

В этом разделе выполнен расчет зависимости энтальпии продуктов сгорания от температуры и уточнение расходных газозвушных характеристик системы ДВС-утилизационный котел. Энтальпия (размерность - кДж/кг) топлива определяется количеством теплоты, которая необходима для нагревания этих газов при постоянном давлении от нуля до данной температуры [3]. Построение диаграммы основан на элементарном составе топлива, среднем влагосодержании воздуха, определенном ранее суммарном коэффициенте избытка воздуха.

Результаты расчета представлены в табличном виде на трех листах: на первом – расчет объемов воздуха и продуктов сгорания, на втором – диаграмма зависимости энтальпии от температуры представлена в табличном (интервал по температуре - 10 °С), на третьем – диаграмма зависимости энтальпии от температуры представлена в графическом виде (интервал по температуре - 100 °С).

Таблица расчета объемов воздуха и продуктов сгорания

Зависимость
"Температура
-энтальпия"
в табличном
виде
(шаг по
температуре
- 10 гр. Ц)

Зависимость
"Температура
-энтальпия"
в графическом
виде
(шаг по
температуре
- 100 гр. Ц)

2.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ (НАЗНАЧЕНИЕ) ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПАРОВОДОЯНОГО ТРАКТА

На основании изучения котла-прототипа, исходных данных и [1] формируется структурная схема котла и на основании справочника "Теплофизических свойств воды и водяного пара" [9] получены необходимые для расчетов теплофизические характеристики паро-водяного тракта, которые сведены в таблицу.

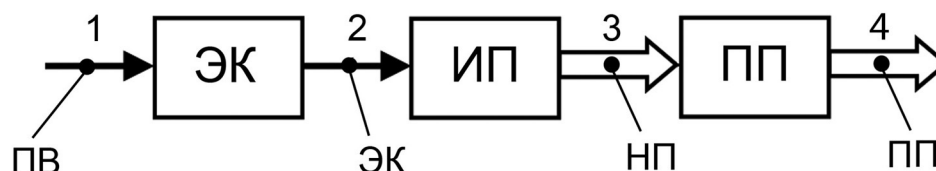


Рисунок 3 - Структурная схема котла

Характерные точки: 1 – питательная вода; 2 – вода на выходе из экономайзера; 3 – насыщенный пар; 4 – перегретый пар; Элементы: ЭК – экономайзер; ИП – испарительный пучок; ПП – пароперегреватель

Таблица 2.3 – Теплофизические свойства пароводяного тракта котла

№ F	Наименование параметра	Обозначение	Размерность	Формула или источник	Численное значение
А	Сопротивление пароперегревателя (при наличии)	$\Delta p_{пп}$	%	Назначаем (потери из интервала 6...9 %)	
Б	Сопротивление экономайзера (при наличии)	$\Delta p_{эк}$	%	Назначаем (потери из интервала 3...5 %)	
1	Питательная вода				
	давление	$p_{пв}$	МПа	$p_{пв} = p_k \cdot (1 + \Delta p_{эк}/100)$	
	температура	$t_{пв}$	°C	Задано	
	энтальпия	$i_{пв}$	кДж/кг	$i_{пв} = f(p_{пв}, t_{пв})$	
	удельный объем	$v_{пв}$	м³/кг	$v_{пв} = f(p_{пв}, t_{пв})$	
2	Экономайзер				
	давление	$p_{эк} = p_k$	МПа	Задано	
	температура	$t_{эк}$	°C	$t_{эк} = t_s - (30 \dots 50)$	
	энтальпия	$i_{эк}$	кДж/кг	$i_{эк} = f(p_{эк}, t_{эк})$	
	удельный объем	$v_{эк}$	м³/кг	$v_{эк} = f(p_{эк}, t_{эк})$	
3	Парообразующая часть				
	давление	p_k	МПа	Задано	
	температура	$t_s = t''$	°C	$t_s = f(p_k)$	
	энтальпия	i''	кДж/кг	$i'' = f(p_k)$	
	удельный объем	$v^s = v''$	м³/кг	$v'' = f(p_k)$	
4	Пароперегреватель				
	давление	$p_{пп}$	МПа	$p_{пп} = p_k \cdot (1 - \Delta p_{пп}/100)$	

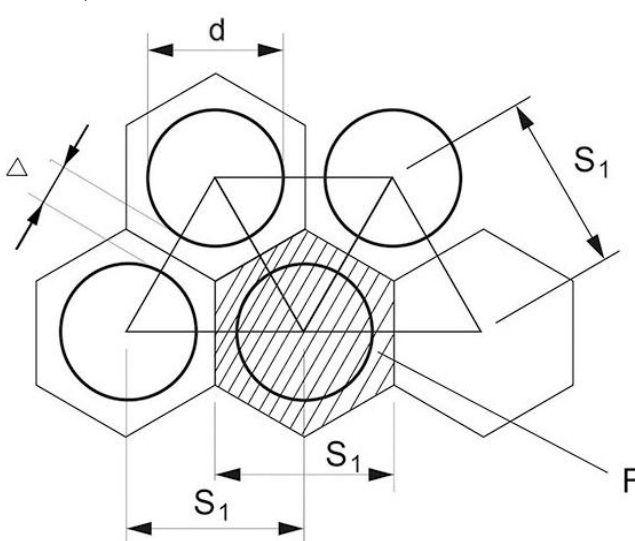
температура	$t_{пп}$	°C	Задано	
энтальпия	$i_{пп}$	кДж/кг	$i_{пп} = f(p_{пп}, t_{пп})$	
удельный объем	$v_{пп}$	м³/кг	$v_{пп} = f(p_{пп}, t_{пп})$	

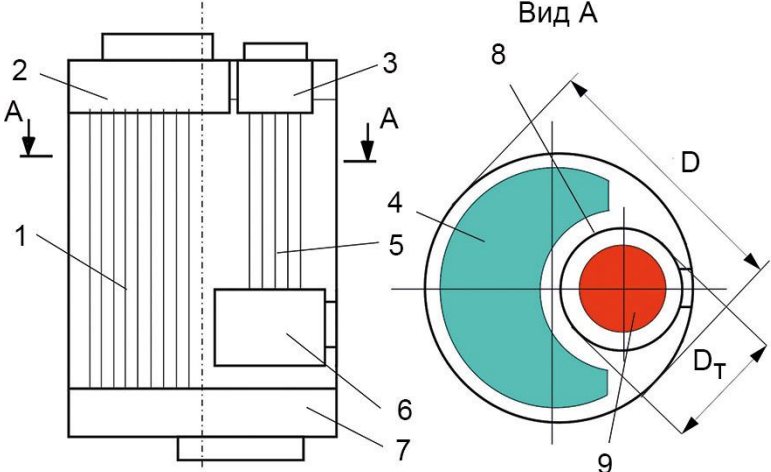
2.4 РАСЧЕТ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ПУЧКА

Цель расчета – определение поверхности нагрева пучка для получения требуемого количества пара при определенных характеристиках газоздушного тракта.

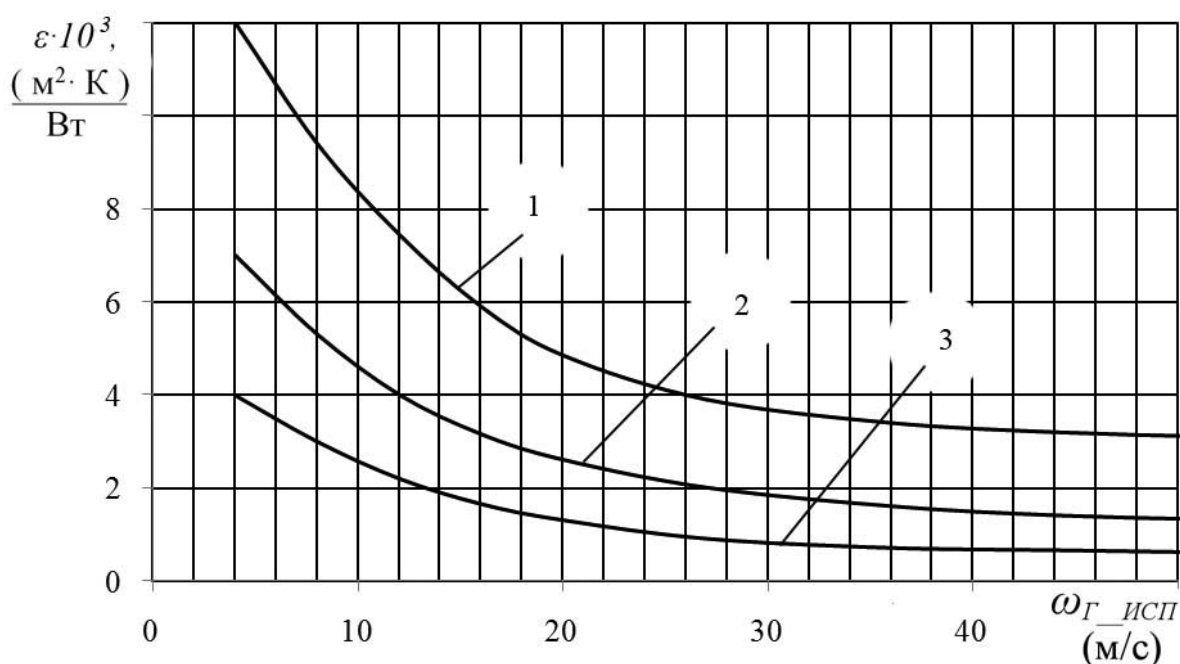
В начале определяется или назначается компоновка пучка по котлу прототипу. Назначается доля площади поперечного сечения утилизационного котла, занятого испарительным пучком; назначаются диаметр труб и структура пучка с равным шагом в поперечном сечении; определяется скорость движения газов через пучек. По требуемой паропроизводительности определяется потребная мощность пучка и температура газов за пучком (температура уходящих газов). По средней температуре газового потока определяются его теплофизические, на основании которых рассчитываются коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи в пучке. Определяется логарифмический температурный напор и требуемая площадь поверхности нагрева (высота пучка).

Таблица 2.4 – Расчет испарительного пучка

№	Определяемый параметр, формула	Обозн.	Разм.	Значение
1	Внутренний диаметр трубы – рисунок 4, (назначается в диапазоне 38...76 мм), $d_{BH} =$	d_{BH}	мм	
2	Наружный диаметр трубы, $d =$	d	мм	
3	Поперечный шаг пучка – рисунок 4, (с учетом расстояния межтрубной пароводяной части и прочности плоского днища в диапазоне $\Delta = 15...25$ мм), $S_{1MM} =$  S_1 – шаг пучка; d – внутренний диаметр трубы; F – затененная площадь одной трубы; Δ – расстояние между соседними трубами Рисунок 4 – Параметры пучка	S_{1MM}	мм	

4	Поперечный шаг пучка, $S_1 =$	S_1	мм	
5	Площадь затененной части одной трубы пучка (рисунок 4): $F_{TP} = 2 \cdot \sqrt{3} \cdot (0,5 \cdot S_1)^2 \cdot 10^{-6} =$	F_{TP}	м ²	
6	Доля сечения котла, занятая трубами утилизационной части (см. рисунок 5), назначать из интервала,; (0,5...0,75), δ  1 – испарительный пучок утилизационной части композитного котла; 2 – выходной газовый короб; 3 – газовый короб вспомогательного котла; 4 – площадь поперечного сечения (искомая) утилизационной части; 5 – испарительный пучок вспомогательного пучка; 6 – топка; 7 – входной газовый короб; 8 – габариты топki; 9 – поперечное сечение испарительного пучка вспомогательного котла; D – средний диаметр прочного корпуса; D _T – средний диаметр топki Рисунок 5 – Площадь сечения утиль-котла	δ	–	
7	Площадь сечения пучка утилизационной части котла, $F_y = \pi \cdot D^2 \cdot 0,25 \cdot \delta =$	F_y	м ²	
8	Количество труб в пучке, $z' = F_y / F_{TP}$	z'	шт	
9	Принятое количество труб в пучке, $z_{ПР} =$	$z_{ПР}$	шт	
10	Площадь живого сечения для прохода газов, $F_{исп} = z_{ПР} \cdot \pi \cdot d_{ВН}^2 \cdot 0,25 =$	$F_{исп}$	м ²	
11	Площадь поверхности нагрева 1 м труб (L=1), $H_1 = z_{ПР} \cdot \pi \cdot d_{ВН} \cdot L =$	H_1	м ²	
12	Мощность испарительного пучка, – $Q_{исп} = D_c (i'' - i_{пв}) =$	$Q_{исп}$	кВт	
13	Температура газов на входе в пучок (из исходных данных), $\vartheta_{ВХ}$	$\vartheta_{ВХ}$	°С	
14	Энтальпия продуктов сгорания на входе в пучок	$J_{ВХ}$	кДж/	

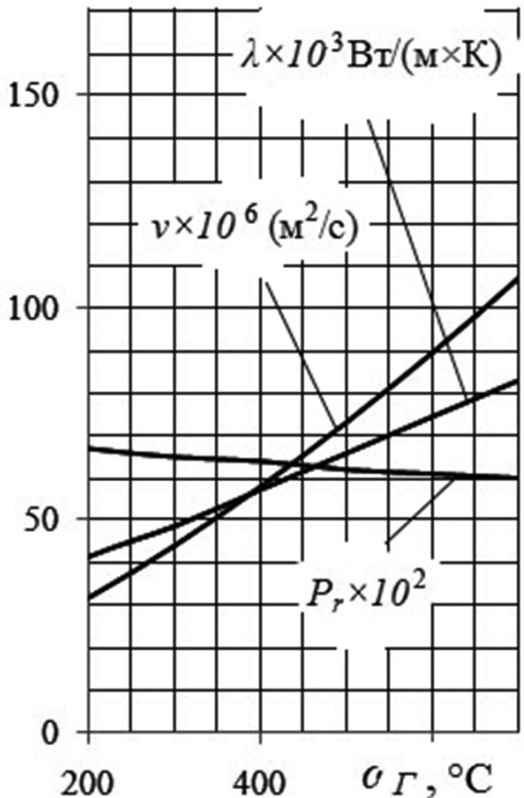
	(по J - ϑ диаграмме) $J_{BX} =$		кГ	
15	Коэффициент сохранения теплоты, φ – принимать из интервала 0,94...0,98	φ	—	
16	Энтальпия газов за пучком, кДж/кг - $J_{ВЫХ} = J_{ВХ} - \frac{Q_{ИСП}}{\varphi \cdot b_E^C} =$	$J_{ВЫХ}$	кДж/кг	
17	Температура газов за пучком (по J - T диаграмме), $\vartheta_{ВЫХ}$	$\vartheta_{ВЫХ}$	°С	
18	Средняя температура газов в пучке, $\vartheta_{CP} = 0,5 \cdot (\vartheta_{ВХ} + \vartheta_{ВЫХ}) =$	ϑ_{CP}	°С	
19	Средняя скорость газов через пучок, $\omega_{Г} = \frac{G_{Г}^C \cdot (\vartheta_{CP} + 273)}{F_{ИСП} \cdot 273 \cdot 1,34} =$	$\omega_{Г}$	м/с	
20	Коэффициент загрязнения (рисунок 6), $\varepsilon =$	ε	—	



1 – испарительный пучек; 2 – пароперегреватель; 3 – экономайзер

Рисунок 6 – Зависимость коэффициента загрязнения пучка от скорости продуктов сгорания

21	Плотность теплового потока (назначать из интервала 10000-50000 Вт/м²), q	q	Вт/м²	
22	Температура загрязненной стенки $t_{CT} = t_s + \varepsilon \cdot q =$	t_{CT}	°С	
23	Коэффициент теплопроводности газов при ϑ_{CP} (рисунок 7), λ	λ	Вт/(м · °С)	
24	Коэффициент кинематической вязкости газов при	ν	м²/с	

	ϑ_{CP} (рисунок 7), $\nu =$			
25	Критерий Прандтля при ϑ_{CP} (рисунок 7), $Pr =$  Рисунок 7 – Зависимость теплофизических характеристик продуктов сгорания от температуры	Pr	–	
26	Критерий Рейнольдса, $Re = \frac{\omega_{\Gamma} \cdot d_{BH}}{\nu} =$	Re	–	
27	Эффективная толщина излучающего слоя (для газотрубных котлов эквивалентна половине внутреннего диаметра трубы, $S_{исп} =$	$S_{исп}$	м	
28	Давление продуктов сгорания в пучке, принимать из интервала (0,105...0,106) МПа, $P =$	P	МПа	
28	Коэффициент ослабления лучей трехатомными газами, $k_{\Gamma} = \left(\frac{2,47 + 5,06 \cdot r_{H_2O}}{\sqrt{P \cdot r_{\Pi} \cdot S_{исп}}} - 1,02 \right) \cdot$ $\left(1 - 0,37 \cdot \frac{\vartheta_{CP} + 273}{1000} \right) \cdot r_{\Pi}$ $=$	k_{Γ}		

29	Приведенная степень черноты трехатомных газов, $a_{\text{ПР}} = (1 - e^{-k_r \cdot P \cdot r_{\text{П}} \cdot S_{\text{исп}}}) \cdot 0,9 =$	$a_{\text{ПР}}$		
30	Коэффициент теплоотдачи излучением, $\alpha_{\text{Л}} = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot a_{\text{ПР}} \cdot (g_{\text{СР}} + 273)^3 \cdot \frac{1 - \left(\frac{t_{\text{СТ}} + 273}{g_{\text{СР}} + 273} \right)^4}{1 - \left(\frac{t_{\text{СТ}} + 273}{g_{\text{СР}} + 273} \right)} =$	$\alpha_{\text{Л}}$	Вт/(м ² ·°C)	
31	Температурная поправка, C_{T}	C_{T}	—	1,0
32	Поправка тепловой стабилизации по длине трубы, $C_{\text{Л}}$	$C_{\text{Л}}$	—	1,0
33	Коэффициент теплоотдачи конвекцией, $\alpha_{\text{К}} = 0,023 \cdot C_{\text{T}} C_{\text{Л}} \frac{\lambda}{d_{\text{ВН}}} (\text{Re})^{0,8} \cdot P_r^{0,4} =$	$\alpha_{\text{К}}$	Вт/(м ² ·°C)	
34	Коэффициент тепловой эффективности утилизационного газотрубного котла: $\psi = 0,70 \dots 0,75$; для утилизационного водотрубного котла $\psi = 0,60 \dots 0,65$; принято:	ψ	—	
35	Коэффициент теплопередачи, $K = \psi \cdot (\alpha_{\text{К}} + \alpha_{\text{Л}}) =$	K	Вт/(м ² ·°C)	
36	Логарифмический температурный напор, $\Delta t = \frac{g_{\text{ВХ}} - g_{\text{ВЫХ}}}{\ln \left(\frac{g_{\text{ВХ}} - t_{\text{С}}}{g_{\text{ВЫХ}} - t_{\text{С}}} \right)} =$	Δt	°C	
37	Необходимая поверхность нагрева испарительного пучка, $H_{\text{исп}} = \frac{Q_{\text{исп}} \cdot 10^3}{K \cdot \Delta t} =$	$H_{\text{исп}}$	м ²	
38	Искомая высота пучка, $H = H_{\text{исп}} / H_1$	H	м ²	

3. АЭРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ КОТЛА

Таблица 3 – Аэродинамический расчет котла

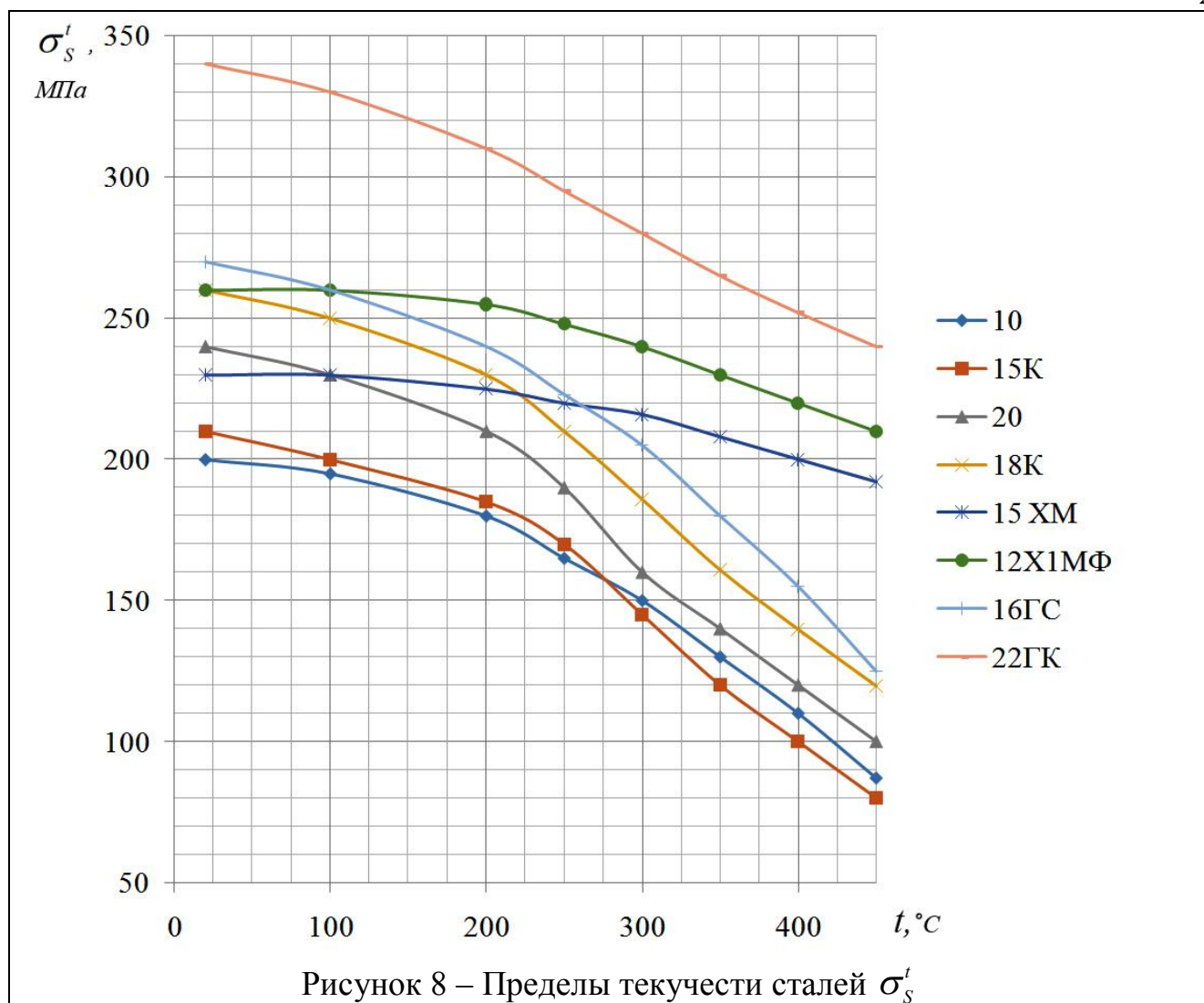
№	Определяемый параметр, формула	Обозн.	Разм.	Значение
1	Эквивалентный диаметр (принимается равным внутреннему диаметру труб пучка и принимается на основании теплового котла), $d =$	d	м	
2	Скорость газов (из теплового расчёта), ω_{Γ}	ω_{Γ}	м/с	
3	Критерий Рейнольдса (из теплового расчёта котла): Re	Re	—	
4	Абсолютная шероховатость стенки (принимается из диапазона $(0,2 \dots 0,7) \text{ мм} = (0,2 \dots 0,7) \text{ м} \cdot 10^{-3}$, $K_{Rz} =$	K_{Rz}	м	
5	Длина трубы (из теплового расчета), H	H	м	
6	Коэффициенты влияния, K_1 $K_1 = \frac{K_{Rz}}{d} =$	K_1	—	
7	Коэффициенты влияния, K_2 $K_2 = \frac{23}{Re}$	K_1	—	
8	Коэффициент сопротивления трения, λ_s Если $K_1 \leq K_2$, тогда $\lambda_s = \frac{0,3164}{Re^{0,25}} =$ Если $K_1 > K_2$, тогда $\lambda_s = \frac{1}{\left(2 \cdot \lg\left(\frac{d}{K_{Rz}}\right) + 1,14\right)^2} =$	λ_s		
9	Средняя плотность газов (из теплового расчета), $\rho_{\Gamma}^t =$	ρ_{Γ}^t	кг/м ³	
10	Сопротивление трения, $\Delta = \lambda_s \cdot \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho_{\Gamma}^t \cdot \omega_{\Gamma}}{2} =$	Δ	Па	
11	Вывод о согласовании совместной работы утилизационного котла в паре с двигателем внутреннего сгорания			

4. ПРОЧНОСТНОЙ РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛА

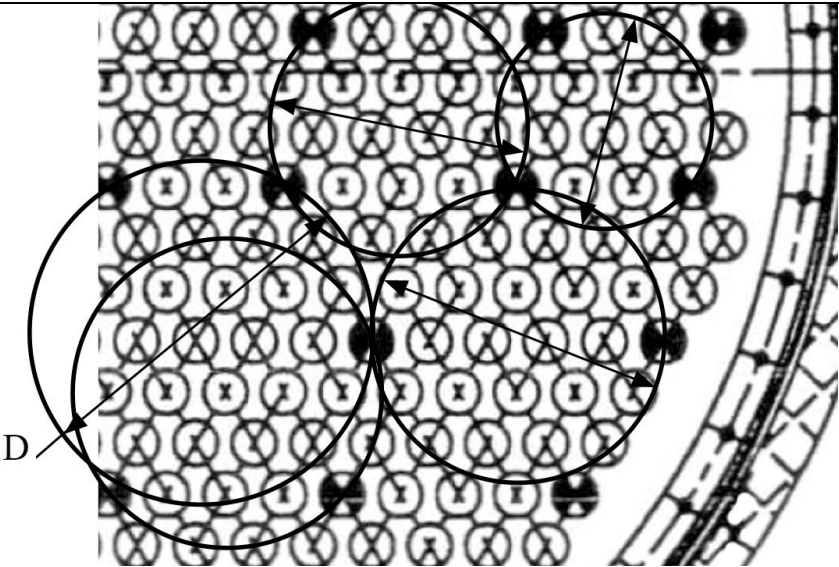
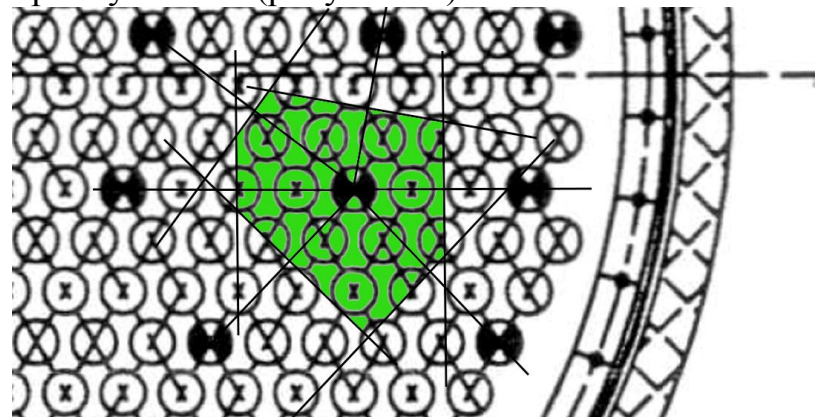
Корпус действующего судового парового котла испытывает значительные нагрузки. Эти нагрузки вызваны параметрами рабочих сред: высокая температура дымовых газов, высокая температура и давление воды и пара. Полученные в ходе выполнения теплового расчета котла рабочие параметры являются исходными для выполнения расчета на прочность элементов котла. Рассчитываемыми элементами являются толщина стенки (днища) пароводяного коллектора и толщина стенки трубы испарительного пучка.

Таблица 4 – Прочностной расчет котла

№	Определяемый параметр, формула	Обозн.	Разм.	Значение
	Поверочный расчет трубы испарительного пучка			
1	Внутренний диаметр трубы (см. тепловой расчет)	d_{BH}	мм	
2	Толщина стенки трубы, назначается на основании рекомендаций таблицы 6, $S =$	S	мм	
3	Расчетное давление, принимается равным рабочему давлению среды, p	p	МПа	
4	Наружный диаметр трубы, $d = d_{BH} + 2 \cdot S =$	d	мм	
5	Расчетная температура стенки (для труб испарительного пучка $t = t_s + 50 =$	t	°C	
6	Назначение материала труб (рисунок 8), -		—	
7	Предел текучести материала (рисунок 8), $\sigma_s^t =$	σ_s^t	МПа	
8	Коэффициент запаса прочности (назначается на основании рекомендаций таблицы 7)	n	—	
9	Допускаемое напряжение, $\sigma_{доп} = \frac{\sigma_s^t}{n}$	$\sigma_{доп}$	МПа	
10	Коэффициент прочности (для бесшовных цилиндрических труб, не ослабленных сварными соединениями принимать $\phi=1$)	ϕ	—	
11	Допускаемое рабочее давление, $p = \frac{2 \cdot \phi \cdot \sigma_{доп} \cdot (S - C)}{d + (S - C)} =$	p	МПа	
12	Соблюдение условий прочности по давлению			
	Поверочный расчет толщины днища котла			
13	Толщина днища прочного корпуса (на основании изучения конструкции котла прототипа), $S_{дн}$	$S_{дн}$	мм	
14	Расчетная температура стенки (для труб испарительного пучка $t = t_s$	t	°C	



15	Назначение материала днищ, (рисунок 8),-		—	
16	Предел текучести материала (рисунок 8), $\sigma_s^t =$	σ_s^t	МПа	
17	Коэффициент запаса прочности (назначается на основании рекомендаций таблицы 7)	n	—	
18	Допускаемое напряжение, $\sigma_{\text{доп}} = \sigma_s^t / n$	$\sigma_{\text{доп}}$	МПа	
19	Коэффициент прочности, для трубных досок вертикальных газотрубных котлов с равным шагом труб в пучке рассчитывать т.о.: $\varphi = (S_1 - d_H) / S_1 =$	φ	—	
20	Условный диаметр наибольшей окружности, которую можно провести через центры трех связей (рисунок 9), D =	D	мм	

	 Рисунок 9 – К определению максимальной неподкрепленной площади трубной доски			
21	Допускаемое рабочее давление, $p = \frac{\varphi \cdot \sigma_{\text{доп}} \cdot (S - C)^2}{0,16 \cdot D^2} =$	p	МПа	
22	Соблюдение условий прочности по давлению			
Поверочный расчет диаметра прочной связи				
23	Наружный диаметр прочной связи (прутка)	d	мм	
24	Расчетная температура стенки прочной связи (для труб испарительного пучка $t = t_s$)	t	°C	
25	Назначение материала прочной связи, (рисунок 8),-		—	
26	Предел текучести материала (рисунок 8), $\sigma_s^t =$	σ_s^t	МПа	
27	Коэффициент запаса прочности (назначается на основании рекомендаций таблицы 7)	n	—	
28	Площадь поверхности плоского днища на одну прочную связь (рисунок 10).  Определяется площадью внутренней поверхности между перпендикулярами, проведенными через середины лучей, исходящих из центра рассчиты-	F	м ²	

	ваемой связи и направленным к центрам соседних связей.			
	Допускаемое напряжение, $\sigma_{\text{доп}} = \sigma_s^t / n$	$\sigma_{\text{доп}}$	МПа	
	Допускаемое рабочее давление, $p = \frac{\sigma_{\text{доп}} \cdot \pi \cdot d^2}{4 \cdot F} =$	p	МПа	

Таблица 6 – Минимальные значения толщины цилиндрической стенки трубы в зависимости от диаметра

Диаметр, $d_{\text{тр}}$ (мм)	до 28	28...37	38...83	84...95	96...121	122...146	147...178	179...191	свыше 192
Толщина стенки, S (мм)	2,0	2,5	3,0	3,25	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5

Таблица 7 – Коэффициенты запаса прочности, n

№	Элемент котла	Внутреннее давление	Наружное давление
1	Цилиндрические стенки	1,7	1,9
2	Котельные трубы	1,7	2,0
3	Выпуклые днища	1,7	2,0
4	Плоские стенки	1,7	–
5	Прямоугольные камеры	1,7	–
6	Связи и связные трубы	2,5	2,5

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морской Регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. – Ленинград : РМРС, 2000. – 834 с. – Текст : непосредственный.
2. РД 31.21.30–97. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций : дата введения 01.07.1997. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : [сайт]. — URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200041473> (дата обращения: 12.02.2024).
3. Александров А. А. Справочные таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара / А. А. Александров, Б. А. Григорьев. – Москва : МЭИ. – 160 с. – Текст : непосредственный.
4. Иванов В. Д. Эксплуатация котельных установок дизельных судов / В. Д. Иванов, Ю. А. Смирнов. – Москва : Транспорт, 1971. – 192 с. – Текст : непосредственный.
5. Очеретяный В. А. Расчеты судового парового котла: учебное пособие к курсовому и дипломному проектированию / В. А. Очеретяный ; Министерство науки и высшего образования РФ, Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2021. – 167 с. – URL: <http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/10016> (дата обращения: 12.02.2024). — Режим доступа: Библиотека Севастопольского государственного университета : [сайт], раздел «Репозиторий eSevSUIR». — Текст : электронный.
6. Очеретяный В. А. Тепловой расчет парового котла. Определение объемов воздуха и расчет диаграммы "Температура-энтальпия" для выполнения КП и ДП для студентов специальности Эксплуатация СЭУ : [компьютерное программное обеспечение "Тепловой расчет котла.xls"] / разработчик: Очеретяный В. А. ; Севастопольский государственный университет, кафедра «Энергоустановки морских судов и сооружений». – Загл. с титул. экрана. – Электронная программа : электронная // OwnCloud Infinite Scale : Secure Cloud Platform. – 2024. – URL: <https://disk.sevsu.ru/index.php/s/b6TGMAapudSnyiT> (дата обращения: 13.02.2024).
7. Пушкин Н. И. Судовые парогенераторы / Пушкин Н. И., Волков Д. И., Дементьев К. С. – Ленинград : Судостроение, 1977. – 505 с. – Текст : непосредственный.
8. Самсонов В. И. Судовые двигатели внутреннего сгорания / В. А. Самсонов, В. И. Худов, А. А. Мирющенко. – Москва : Транспорт, 1981. – 400 с. – Текст : непосредственный.
9. Селиверстов В. М. Утилизация тепла в судовых дизельных установках / В. М. Селиверстов. – Ленинград : Судостроение, 1973. – 256 с. – Текст : непосредственный.
10. Хряпченков А. С. Судовые вспомогательные и утилизационные котлы / А. С. Хряпченков. - Ленинград : Судостроение, 1989. – 296 с. – Текст : непосредственный.