

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра энергоустановок морских судов и сооружений

А.Ю. Гаршин

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБИННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ

Методические указания
по выполнению лабораторной работы

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 629.5.03-135 (076)

ББК 39.455я73

Г21

Р е ц е н з е н т:

Е.В. Хромов – канд. техн. наук, доцент каф. ЭМСС

Гаршин А.Ю.

Г21 Исследование характеристик турбинной сопловой решетки: метод. указания по выполнению лабораторной работы / Сост. А.Ю. Гаршин. – Севастополь: СевГУ, 2020. – 12 с.

Рассматривается лабораторная работа по исследованию характеристик турбинной сопловой решетки, выполняемая при изучении курса «Судовые турбомашины».

Предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок.

Выполнение лабораторной работы направлено на изучение следующих профессионально-специализированных компетенций (Конвенция ПДНВ):

ПСК-37: Способность сформировать цели проекта (программы), разработать обобщенные варианты ее решения, выполнить анализ этих вариантов, прогнозирование последствий, нахождение компромиссных решений.

ПСК-38: Способность разработать проекты объектов профессиональной деятельности с учетом физико-технических, механико-технологических, эстетических, экологических, эргономических и экономических требований, в том числе с использованием информационных технологий.

УДК 629.5.03-135 (076)

Рассмотрены и рекомендованы кафедрой энергоустановок морских судов и сооружений Морского института Севастопольского госуниверситета в качестве методических указаний к выполнению лабораторной работы по дисциплине «Судовые турбомашины» для студентов специальности 26.05.06 – Эксплуатация судовых энергетических установок, протокол № 1 от 31 августа 2020 г.

© ФГАОУВО «Севастопольский
государственный университет», 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	4
Лабораторная работа.	
«Исследование характеристик турбинной сопловой решетки»	5
1.1. Теоретическое обоснование	5
1.2. Описание установки	7
1.3. Проведение измерений	8
1.4. Протокол испытаний	9
1.5. График распределения давления и осреднение давления по шагу	9
1.6. Коэффициент скорости, профильный КПД решетки, коэффициент потерь и число Re	10
1.7. Содержание отчета	10
1.8. Контрольные вопросы	10
1.9. Научно-исследовательская работа студентов	10
Литература	12

ВВЕДЕНИЕ

Целью лабораторных работ является закрепление теоретического материала по дисциплине «Судовые турбомашинны» и получение практических навыков по замерам экспериментальных параметров лабораторных установок, их обработке и построению энергетических характеристик, а также приобретение навыков по эксплуатации судовых турбоустановок.

К лабораторным работам допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности в лабораториях кафедры ЭМСС.

За время проведения лабораторных работ студенты знакомятся с лабораторными установками, получают допуск к проведению экспериментов, проведению замеров и эксплуатации установок. Проводят замеры параметров по приборам, записывают их в отчет, производят обработку опытных данных, оформляют результаты исследований и записывают полученные результаты.

Для получения допуска к выполнению работ необходимо:

- иметь оформленный отчет о работе;
- знать теоретические основы по теме работы;
- знать схему лабораторной установки, порядок проведения опыта или эксплуатации установки.

Отчет должен содержать:

- наименование работы, цель, схему и краткое описание установки;
- основные формулы и формулировки;
- таблицы опытных данных;
- таблицы с результатами расчетов;
- необходимые графики и выводы.

Во время защиты лабораторных работ преподаватель проверяет правильность полученных студентом результатов и его теоретические знания.

Методические указания содержат контрольные вопросы, способствующие закреплению теоретического материала при самостоятельной работе студентов.

1. Лабораторная работа

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБИННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ

Цель лабораторной работы: закрепление студентами теоретических знаний и получение практических навыков в изучении приборов для измерения параметров потока, снятие эпюры полных давлений на выходе за решеткой, определение коэффициента скорости, КПД и коэффициента профильной потери в решетке.

1.1. Теоретическое обоснование

Потери энергии в турбинных решетках можно разделить на две группы: профильные и концевые.

Рассматриваются профильные потери в элементарной решетке, выделенной на каком-либо радиусе облопачивания двумя цилиндрическими поверхностями с бесконечно малым расстоянием между ними.

Эти потери обуславливаются:

1. Трением в пограничном слое, образующемся на профиле лопаток;
2. Вихреобразованием в зоне за выходными кромками. При больших скоростях дополнительно;
3. Отрывом потока от поверхности профиля.
4. Скачками уплотнения, возникающими в межлопаточном канале при переходе сверхзвуковой скорости в дозвуковую.

Концевые потери в данной работе не учитываются. Концевые потери вызываются наличием концевых поверхностей, ограничивающих решетку по высоте.

Концевые потери вызываются:

1. Трением в пограничном слое, образующимся на концевых поверхностях.
2. Образованием вторичных течений в канале между лопатками у концевых поверхностей, обусловленных неравномерным полем давлений по сечению канала.
3. Протеканием газа с вогнутой стороны лопатки на спинку через радиальный зазор между лопатками и корпусом или ротором турбины (при отсутствии банджа).

Потери на решетках характеризуются коэффициентом скорости.

Коэффициент скорости сопловой решетки представляет собой отношение действительной скорости выхода потока из сопел к теоретической:

$$\varphi = \frac{c_1}{c_{1t}} . \quad (1.1)$$

КПД решетки представляет отношение действительной кинетической энергии потока на выходе из решетки к теоретической. Так как кинетическая энергия пропорциональна квадрату скорости, то указанное отношение можно заменить отношением квадратов соответствующих скоростей, т.е.

$$\eta_{пр} = \varphi^2 . \quad (1.2)$$

Коэффициент профильной потери в решетке:

$$\xi_{пр} = 1 - \eta_{пр} . \quad (1.3)$$

Коэффициент скорости зависит от формы профиля, чистоты обработки его поверхности, характера обтекания и относительного шага $\bar{t} = t/b_c$

Вычисление скоростей меньше 100 м/с производится без учета сжимаемости по формуле

- теоретическая скорость

$$c_{1t} = \sqrt{2(P_0^* - P_a) / \rho} = \sqrt{2P_{o.изб}^* / \rho} , \quad (1.4)$$

- действительная скорость

$$c_1 = \sqrt{2(P_1^* - P_a) / \rho} = \sqrt{2P_{1.изб}^* / \rho} , \quad (1.5)$$

откуда

$$\varphi = \sqrt{P_{1.изб}^* / P_{o.изб}^*} , \quad (1.6)$$

где ρ - плотность, кг/м³;

P_a - атмосферное давление, Па;

$P_o^*, P_{o.изб}^*$ - заторможенное абсолютное и избыточное давление на входе в решетку, Па;

$P_1^*, P_{1.изб}^*$ - заторможенное абсолютное и избыточное давление на выходе из решетки, Па.

Поскольку давление за решеткой $P_{1.изб}^*$ меняется по шагу, его необходимо осреднять, т.е.

$$\varphi = \sqrt{P_{1.изб.ср}^* / P_{o.изб}^*} . \quad (1.7)$$

При изложении результатов опытов необходимо указывать, при каких значениях числа Рейнольдса они проводились:

$$R_e = \frac{b_c c_1}{\nu_1}, \quad (1.8)$$

где b_c - хорда лопаток, м;

ν_1 - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

(принимается из таблицы 1 в зависимости от температуры t_1).

Для нахождения скорости C_1 необходимо знать среднюю плотность воздуха в решетке

$$\rho = \frac{P_{cp}}{(RT)}, \quad (1.9)$$

где $R = 287,2$ Дж/(кг К) – газовая постоянная воздуха;

$P_{cp} = \frac{1}{2}(P_a + P_{o.изб} + P_a) = P_a + \frac{1}{2}P_{o.изб}$ – среднее для решетки давление, Па;

$P_{o.изб}$ – статическое избыточное давление на входе в решетку (ввиду малой величины скоростного напора перед решеткой принимается равным $P_{o.изб}^*$);

T_0 – температура перед решеткой, К;

T – средняя для решетки температура, К, принимается приближенно равной T_0 .

Таблица 1.1– Зависимость коэффициента кинематической вязкости от температуры

t_1 °C	$\nu \cdot 10^6$, м/с ²	t_1 °C	$\nu \cdot 10^6$, м/с ²	t_1 °C	$\nu \cdot 10^6$, м/с ²
0	13,28	30	16,00	60	18,97
10	14,16	40	16,96	70	20,02
20	15,06	50	17,95	80	21,09

1.2. Описание установки

Сжатый воздух от нагнетателя поступает по трубопроводу в успокоительный бак 2, а затем по каналу прямоугольного сечения подводится к исследуемой решетке профилей 3 (рис. 1.1). Насадки полного давления 4 и 5 установлены перед и за решеткой. Насадок 4 трехточечный: центральный приемник в этом насадке служит для измерения полного давления, а два боковых для измерения направления потока. По равенству давлений в последних, насадок устанавливается по потоку.

Насадок 4 расположен в координатном устройстве 5, которое

позволяет поворачивать насадок вокруг собственной оси и перемещать его как вдоль решетки, так и по высоте лопатки. К насадкам с помощью резиновых трубок подключены манометры 6 и 8 для замера полных давлений и манометр 6 для установки насадка 4 по потоку. Температура воздуха в баке измеряется термометром 1.

1.3. Проведение измерений

Работа проводится при постоянном давлении перед решеткой (при постоянных оборотах нагнетателя). Заторможенное давление (избыточное) перед решеткой измеряется манометром 8. Заторможенное давление за решеткой измеряется манометром 7 в различных точках вдоль оси решетки (по шагу) комбинированным насадком 4. В процессе измерения давления за решеткой необходимо поворотом координатника устанавливать насадок 4 по потоку (по нулевому показанию манометра 6). Результаты измерений заносятся в протокол испытаний.

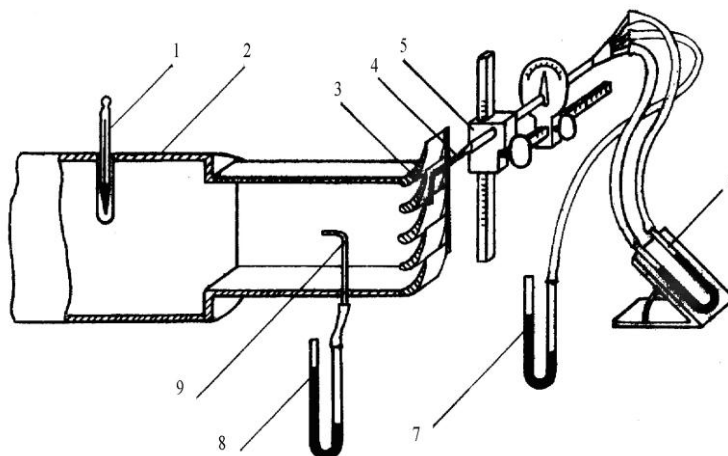


Рис. 1.1 - Схема опытной установки:

1 - термометр; 2 - бак успокоительный; 3 - решетка профилей; 4 - насадок комбинированный; 5 - координатник; 6 - манометр для установки насадка по потоку; 7, 8 - манометры; 9 - насадок полного давления;

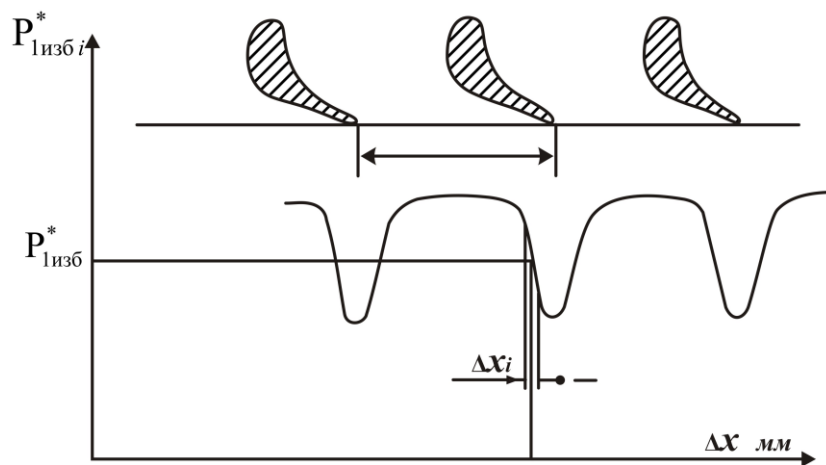


Рис. 1.2 - График распределения давления по шагу

1.4. Протокол испытаний

Шаг лопатки	$t =$	мм
Хорда профиля	$b_c =$	мм
Атмосферное давление	$p_a =$	Па
Заторможенное давление (избыточное) перед решеткой	$P_{0 \text{ изб}}^* =$	Па
Температура потока перед решеткой	$t_0 =$	°C

Таблица 1.2 – Протокол испытаний

Наименование	Обозн.	Ед. изм.	Численное значение											
Перемещение насадки по шагу		мм												
Показание и-образного манометра за решеткой		мм вод. ст.												
Заторможенное давление за решеткой		Па												

1.5. График распределения давления и осреднение давления по шагу

Используя данные протокола испытаний, построить график распределения заторможенного избыточного давления за решеткой по шагу (рис. 1.2). По данным таблицы 1.2 заполняем таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Распределение давления и осреднение давления по шагу

x_i	мм													
Δx_i	мм													
$P_{1 \text{ изб.} i}$	Па													
$P_{1 \text{ изб.} i} \Delta x_i$	Па.мм													

$$\text{Среднее давление за решеткой } P_{1 \text{ изб. ср}} = \frac{\sum P_{1 \text{ изб.} i} \Delta x_i}{\sum \Delta x_i}, \text{ Па;} \quad (1.10)$$

$$\sum \Delta x_i = t, \text{ мм.}$$

1.6. Коэффициент скорости, профильный КПД решетки, коэффициент потерь и число Re

$$\text{Коэффициент скорости } \varphi = \sqrt{P_{1.изб.ср}^* / P_{0.изб}^*}; \quad (1.11)$$

$$\text{Профильный КПД решетки } \eta_{np} = \varphi^2; \quad (1.12)$$

$$\text{Коэффициент профильных потерь } \xi_{np} = 1 - \eta_{np}; \quad (1.13)$$

Среднее давление в решетке (абсолютное)

$$P_{ср} = P_a + 0,5 P_{0.изб}, \text{ Па}; \quad (1.14)$$

$$\text{плотность } \rho = \frac{P_{ср}}{(RT)}, \text{ кг/м}^3; \quad (1.15)$$

$$\text{скорость потока за решеткой } c_1 = \sqrt{2 P_{1.изб.ср} / \rho}, \text{ м/с}; \quad (1.16)$$

$$\text{коэффициент кинематической вязкости } \nu_1 = \dots, \text{ м/с}^2; \quad (1.17)$$

$$\text{число Рейнольдса } Re = \frac{b c_1}{\nu_1}. \quad (1.18)$$

1.7. Содержание отчета

Отчет должен содержать основные расчетные формулы, описание и схему установки, протокол с результатом испытания и соответствующим графическим построением и результатами расчетов.

1.8. Контрольные вопросы

1. Что называется коэффициентом скорости, и что он характеризует?
2. Чем обусловлены профильные и концевые потери?
3. От чего зависит коэффициент скорости?
4. Перечислить основные элементы опытной установки.

1.9. Научно-исследовательская работа студентов

1. Пользуясь литературными источниками, опишите современные аэродинамические трубы, применяемые для продувок решеток профилей, обратив особое внимание на конструктивные решения, позволяющие проводить исследования при различных углах атаки, шаге и высоте лопаток.

2. Объясните выбор параметров потока в упомянутых трубах.

3. Дайте подробное описание зондов, применяемых при

аэродинамических исследованиях, методики их тарировки и тарировочных стендов.

4. Обоснуйте методику обработки результатов продувок решетки профилей при около- и сверхзвуковых скоростях.

5. Измерьте в процессе эксперимента распределение давления по шагу в нескольких сечениях по высоте лопатки за решеткой, постройте графики распределения давления.

6. Проведите испытания при различных давлениях перед решеткой и постройте зависимость коэффициента скорости от числа Рейнольдса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Морской регистр судоходства. Правила классификации и постройки морских судов. – Л.: РМРС, 2008. – 834 с.
2. Слободянюк Л.И. Судовые паровые и газовые турбины и их эксплуатация / Л.И. Слободянюк, В.И. Поляков. – Л.: Судостроение, 1983. – 354 с.
3. Артемов Г.А. Судовые газотурбинные установки / Г.А. Артемов, В.П.Бойко, А.Г. Гильмутдинов. - Л.: Судостроение, 1978. – 246 с.
4. Зайцев В.И. Судовые паровые и газовые турбины / В.И. Зайцев и др. - М.: Транспорт, 1981. – 311 с.
5. Беляев И.Г. Эксплуатация судовых утилизационных установок / И.Г. Беляев. – М.: Транспорт, 1987. – 172 с.
6. Горбов В.М. Основы технической эксплуатации судовых газотурбинных установок / В.М. Горбов. – Н.: УГМТУ, 1996. – 233 с.
7. Правила технической эксплуатации судовых технических средств и конструкций. Часть VI Судовые паровые турбоагрегаты: РД 31.21.30-97, 1997. – 369 с.
8. Газотурбинные установки. Организация эксплуатации и технического обслуживания. Нормы и требования. Стандарт Организации ОАО РАО «ЕЭС России». – М., 2008. – 23 с.

Гаршин Александр Юрьевич

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБИННОЙ СОПЛОВОЙ РЕШЕТКИ

*Методические указания
по выполнению лабораторной работы*

В авторской редакции

Изд. № 272/19. Объем 0,75 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»