

М484745

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ СССР ПО НАРОДНОМУ ОБРАЗОВАНИЮ
Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое
училище им. Н.Э.Баумана

НАЧ. ОТДЕЛА
НЕВЕРНО

На правах рукописи
УДК 621.415

КРУШНОВ Борис Алексеевич

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
РЕГЕНЕРАТОРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ С ВНЕШНИМ
ПОСВОДОМ ТЕПЛОТЫ

05.04.02 - Тепловые двигатели

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических
наук

Москва - 1989

Работа выполнена на кафедре Э-2 Московского ордена Ле-
нина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Крас-
ного Знамени высшее техническое училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор

А.С.ОРИН

Научный руководитель:
кандидат технических
наук, доцент

С.И.ЕЖИМОВ

Официальные оппоненты:
доктор технических
наук, профессор
кандидат технических
наук, с.н.с.

Н.Н.ИВАНЧЕНКО

Д.А.ШЕВИЧ

Ведущее предприятие:

ИЭТНЭ АН Лит.ССР

Защита состоится 29 мая 1989 г. в 14 часов
на заседании специализированного Совета К 053.15.05 "Тепло-
вые м
им. Н
берег

МВТУ

овская на-

МВТУ

им. Е

ный
Моск
Учен

заверен-
107005,
мана,

M 484775

ОИ
КЕ

ИМОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ускорение темпов развития и увеличении объемов производства, появление новых отраслей в народном хозяйстве, использование природных ресурсов в экономически труднодоступных районах предопределяет необходимость прогрессивного и опережающего развития энергетической базы страны. Одновременно с развитием энергетики все большее значение приобретают вопросы экономии топливно-энергетических ресурсов, использования дешевых видов топлив и новых источников энергии. На передний план выходят проблемы, связанные с защитой окружающей среды, проблемы надежности, долговечности, автономности энергопреобразователей. В решениях XXVII съезда КПСС поставлена задача расширения использования низкосортных топлив, возобновляемых источников энергии, новых типов энергоустановок.

В последние годы повышенное внимание исследователей сосредоточено на разработках и создании двигателей с внешним подводом теплоты (ДВПТ), обладающих более широкими возможностями для решения перечисленных проблем, по сравнению с традиционными тепловыми машинами, такими, как, например, двигатели внутреннего сгорания. По Постановлению ГКНТ СМ СССР № 420 от 22 ноября 1976 года разработана программа проведения НИР и ОКР по созданию двигателей с внешним подводом теплоты. Программой предусмотрено проведение исследований и разработка методов расчета рабочего процесса ДВПТ, в том числе методов расчета теплогидродинамических процессов в теплообменных аппаратах (ТА) внутреннего контура двигателя.

Регенератор, входящий в число теплообменных аппаратов внутреннего контура, оказывает существенное влияние на мощность двигателя и определяющее влияние на экономичность. Существует огромное число работ по экспериментальному исследованию и методам расчета регенераторов, однако, до настоящего времени нет достаточно надежных рекомендаций по проектированию регенераторов двигателей с внешним подводом теплоты. Разработка методики расчета регенераторов ДВПТ осложнена трудностями математического описания нестационарных процессов в каналах извилистой формы и отсутствием достаточных экспериментальных данных по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям в насадках реге-

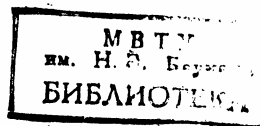
I

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1484775

Крупнов Б.А. Расчетно-экспе



нераторов, работающих в условиях пульсирующего реверсивного потока рабочего тела. Кроме того, недостаточно полно изучен вопрос о влиянии конструктивных параметров насадки на характеристики регенератора ДВРТ, а также вопрос о влиянии характеристик регенератора на выходные параметры двигателя.

Решение перечисленных проблем позволит усовершенствовать методики расчета рабочего процесса проектируемых двигателей, что существенно сократит поиск оптимальных конструктивных решений и ускорит работы по созданию промышленных образцов двигателей с внешним подводом теплоты.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование работы регенераторов в системе ДВРТ, направленное на создание методики расчета регенераторов, работающих в условиях пульсационных изменений параметров потока рабочего тела, и на разработку рекомендаций по выбору и корректировке конструктивных параметров насадки с целью оптимизации рабочего процесса проектируемых двигателей.

Методы исследований. При проведении исследований использованы методы физического моделирования, теории подобия, методы статистической обработки результатов экспериментов. Расчеты и обработка результатов экспериментов проведены на ЭВМ СМ-1021 с использованием стандартных программ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- разработана методика расчета регенеративных теплообменных аппаратов ДВРТ, позволяющая на стадии проектирования выбрать рациональные геометрические параметры насадки;
- разработана методика расчета и корректировки закона изменения температуры насадки по высоте регенератора;
- показана взаимосвязь закона изменения температуры насадки с коэффициентом проточности;
- для проведения экспериментальных исследований создана установка, моделирующая рабочие процессы в двигателях с внешним подводом теплоты;
- получены экспериментальные данные по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям в насадках регенераторов, работающих в условиях пульсирующего реверсивного потока рабочего тела;
- обобщены критериальными зависимостями экспериментальные данные по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям для раз-

личных конструкций насадок.

Практическая ценность. Результаты проведенных расчетно-экспериментальных исследований, разработанные рекомендации и методики могут быть использованы для выбора конструктивных параметров регенераторов на стадии проектирования двигателей с внешним подводом теплоты и при проведении поверочных расчетов регенераторов ДВРТ. Методики могут входить в общую методику теплового расчета двигателя, что позволит проводить оптимизацию по соотношению конструктивных параметров внутреннего контура. Расчетные данные о законе изменения температуры насадки по вносите регенератора позволят уточнить значение величины приведенного "мертвого" объема. Оптимизация двигателя по параметру "мертвого" объема регенератора с корректировкой закона изменения температуры насадки увеличивает возможности конструкторов по созданию двигателей с высокими технико-экономическими показателями.

Реализация результатов работы. Основные результаты исследования использованы при разработке регенеративных теплообменных аппаратов опытных двигателей в ряде организаций. В частности, использованы рекомендации по выбору конструктивных соотношений насадки регенератора и методики оценки потерь от недорегенерации и гидравлических сопротивлений.

Результаты исследований и экспериментальная моделирующая установка используются при проведении НИР, ОКР и в учебном процессе на кафедре "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Апробация работы. Основные положения и отдельные разделы диссертационной работы доложены на ежегодных научно-технических конференциях по итогам НИР кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1981, 1982, 1986 гг.) и на Всесоюзной научно-технической конференции (Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и на новых топливах. - М.:1987).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 статей, тезисы доклада на Всесоюзной научно-технической конференции 1987 г., получено 4 авторских свидетельства. Отдельные разделы диссертации отражены в отчетах по выполненным в МВТУ им. Н.Э.Баумана при участии автора научно-исследовательским темам.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы, приложений. Объем диссертации - 127 страниц основного текста, 51 рисунок, 2 таблицы. Список использованных источников включает 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрены основные преимущества двигателей с внешним подводом теплоты по сравнению с традиционными энергопреобразователями. Показано, что создание достаточно надежных методик теплового расчета ДВТТ требует глубокого изучения теплогидродинамических процессов в теплообменных аппаратах внутреннего контура двигателя. Определено основное направление исследования и показана его актуальность.

В первой главе представлен краткий обзор по методам расчета рабочего процесса двигателей с внешним подводом теплоты, рассмотрены особенности работы теплообменных аппаратов в системе ДВТТ. Проанализированы методы расчетно-экспериментальных исследований регенераторов. Представлены результаты экспериментальных исследований характеристик теплоотдачи и гидравлических сопротивлений насадок регенераторов. Сформулирована цель диссертационной работы.

В любой из методик расчета рабочего процесса внутреннего контура ДВТТ присутствуют коэффициенты теплоотдачи α , гидравлического сопротивления ξ и температуры теплообменных поверхностей. В упрощенной модели Шмидта коэффициенты теплоотдачи приняты бесконечными, коэффициенты гидравлического сопротивления равны нулю. В методах узлового анализа коэффициенты α и ξ могут быть заданы постоянными или переменными по времени и координате. Значительное влияние, которое оказывает на конечные результаты расчета выбор указанных коэффициентов и температур может свести на нет преимущества применения более точных методик расчета.

Регенератор, входящий в число теплообменных аппаратов внутреннего контура оказывает наиболее существенное влияние на экономические показатели двигателя. Снижение эффективности регенератора на 1 % уменьшает индикаторный к.п.д. двигателя на (3-8) %. Расчетно-экспериментальным исследованиям регенераторов посвящено большое число работ. Анализ известных методов

расчета регенераторов показывает несовершенство большинства математических моделей. Методики не учитывают ряда факторов, присущих работе регенераторов ДВПТ. Сравнение экспериментальных данных, полученных разными авторами, показывает, что характеристики теплообмена и гидравлических сопротивлений насадочных поверхностей подобных геометрий существенно различны. Числа Nu и коэффициенты гидравлических сопротивлений ξ отличаются в 2-5 раз даже при статических условиях продувок.

Характерной особенностью работы регенераторов ДВПТ является пульсационный и реверсивный характер потока рабочего тела, что в значительной степени затрудняет как возможность использования теплогидродинамических характеристик, полученных в статических условиях продувок, так и проведение экспериментальных исследований насадок регенераторов ДВПТ.

К регенераторам ДВПТ предъявляют три основных требования: обеспечение минимального "мертвого" объема, минимального гидравлического сопротивления и максимального теплового потока на поверхность теплообмена. В качестве дополнительного можно указать требование увеличения средней температуры насадки. Очевидно, что требования противоречивы. Изменение одних параметров насадки с целью улучшения работы двигателя вызывает изменение других параметров, приводящих к ухудшению технико-экономических показателей.

На основании вышеизложенного, целью настоящего расчетно-экспериментального исследования является:

- разработка упрощенной методики расчета регенераторов, работающих в системе ДВПТ;
- разработка метода расчета изменения температуры насадки по высоте регенератора;
- экспериментальное исследование различных конструкций насадок регенераторов на моделирующей установке;
- разработка методики обработки экспериментальных данных для получения критериальных зависимостей по теплообмену и гидродинамике в насадках регенераторов, работающих в условиях пульсирующего потока рабочего тела;
- разработка рекомендаций по проектированию регенераторов ДВПТ.

Во второй главе представлено описание моделирующей уста-

новки для исследования теплообменных аппаратов в пульсирующем режиме; рассмотрена возможность моделирования рабочего процесса ДВПТ.

Характер движения и параметры потока рабочего тела в теплообменных аппаратах определяют такие параметры двигателя, как соотношение максимальных объемов "холодной" и "горячей" полостей W , фазовый угол сдвига φ , коэффициент давления δ , значение относительного "мертвого" объема V_s , частота вращения ω , характерные давления и температуры и т.д. Для осуществления возможности моделирования работы ТА в широких пределах конструктивных и рабочих параметров ДВПТ в МВТУ им. Н.Э.Баумана разработана и создана моделирующая установка. Установка позволяет работать с полноразмерными модулями или отдельными элементами теплообменников двигателей мощностью до 100 кВт и частотой вращения до 40 с⁻¹. Проведение исследований ТА с учетом геометрического подобия практически не ограничивает возможности установки по мощностным характеристикам.

Принцип действия установки заключается в создании на входных участках ТА периодических возмущений потока рабочего тела в результате преобразования располагаемого динамического напора потока в потенциальную энергию давления. В состав установки входят: пульсатор, обеспечивающий законы изменения давлений и расходов, соответствующих аналогичным параметрам в двигателе; пневматическая система; электрическая; система охлаждения; система измерений. В качестве рабочего тела может быть использован любой газ, однако, учитывая то, что установка открытого цикла, целесообразно использовать в экспериментах наиболее дешевое рабочее тело - воздух.

Экспериментальные характеристики ТА, полученные при работе на воздухе могут быть применены для расчета ТА двигателей, работающих на других рабочих телах при соблюдении идентичности числовых значений минимально допустимых критериев подобия, количество которых определено на основании π -теоремы. Приведение уравнений энергии, неразрывности и движения к безразмерному виду позволяет выделить пять критериев. В качестве дополнительного, шестого критерия использован коэффициент давления.

В третьей главе исследована взаимосвязь между конструктивными параметрами насадки регенератора на основе анализа сум-

марных потерь в регенераторе; проведен расчет эффективности регенератора и расчет температуры насадки с учетом циклических изменений давления; приведены схемы предварительного и поверочного расчета регенератора.

Общие потери в регенераторе складываются из тепловых потерь от недорегенерации, тепловых потерь, связанных с утечками по тепловым мостам и из потерь на переталкивание рабочего тела. Проведение расчета регенератора при принятии основных допущений Хаузена не представляет большой сложности. Основная трудность заключается в оптимизации конструкции регенератора. При оптимизации конструкции регенератора в качестве исходных параметров были приняты: значение отношения "мертвого" объема регенератора V_{SR} к максимальному объему горячей полости V_{Emax} ($\psi = \frac{V_{SR}}{V_{Emax}}$); снижение эффективности регенератора, определяемое ограничением отношения водяного эквивалента насадки к водяному эквиваленту рабочего тела $\bar{W}_H/\bar{W}_P$ и относительными величинами утечек по тепловым мостам $\frac{\Delta Q_L}{Q}$. В этом случае величины пористости насадки P , диаметр проволоки d , высота H_K и диаметр D_K регенератора определяются однозначно для условия обеспечения минимальных суммарных потерь в регенераторе. Значение отношения $\bar{W}_H/\bar{W}_P$ нецелесообразно выбирать большим 7-10. Оптимизация конструкции регенератора ДВПТ сводится, таким образом, к варьированию двух параметров: относительных потерь по тепловым мостам $\frac{\Delta Q_L}{Q}$ и величины отношения $\psi = \frac{V_{SR}}{V_{Emax}}$.

Одно из основных отличий работы регенератора в системе ДВПТ состоит в изменении массы рабочего тела в объеме насадки регенератора в течение цикла вследствие пульсаций давления. При расчете эффективности регенератора ДВПТ по методике (η_R -NTU), предполагающей линейное изменение температуры насадки и постоянный массовый расход рабочего тела по высоте регенератора, следует учитывать значение величины коэффициентов прочности K_n и давления δ :

$$\eta_{Rcp} = \sqrt{\frac{(NTU_{cp})^2}{(NTU_{cp} + 1)^2 + \left(\frac{\delta}{K_n}\right)^2}} \quad (I)$$

Расчет рабочего процесса двигателя предполагает известным распределение температур рабочего тела по внутреннему контуру. Проведен расчет изменения средней температуры насадки по высо-

те регенератора при учете пульсаций давлений. В результате расчета показано, что закон изменения температуры насадки по высоте регенератора существенно отличается от линейного и зависит от соотношений массовых расходов на горячей и холодной сторонах регенератора, от значений коэффициентов теплоотдачи и геометрии насадки. Температуры насадки может быть при необходимости скорректирована путем изменения конструктивных параметров насадки по высоте регенератора, в частности, путем изменения поверхности теплообмена. При известном законе изменения температуры насадки оптимизационный расчет регенератора можно проводить поэлементно, рассматривая каждый элемент, как регенератор Клаузена.

В четвертой главе представлено описание экспериментального участка, методика проведения и обработки результатов испытаний, проведена оценка погрешности измерений.

Экспериментальное исследование насадок регенераторов проведено на моделирующей установке в составе теплообменного модуля ДВНТ, включающего холодильник, регенератор и нагреватель. Установка работала по схеме одностороннего входа рабочего тела со стороны холодильника. Горячая полость двигателя моделировалась аккумулялирующим объемом. Во время эксперимента проведено измерение мгновенных давлений, перепадов давлений и мгновенных температур рабочего тела на холодной и горячей сторонах регенератора. Фиксировались средние температуры рабочего тела, насадки и нагревателя.

Проведены исследования собранных из таблеток насадок регенераторов, изготовленных из нихромовой проволоки. Первая серия экспериментов проведена с короткими насадками со следующей геометрией: высота таблетки $H_r = 5$ мм, число таблеток $n = 3$; диаметр регенератора $D_k = 55$ мм; отношение высоты насадки к диаметру регенератора $k = \frac{H_r}{D_k} = 0,27$. Варианты соотношений между пористостью насадок с диаметром проволоки представлены в табл. I.

На пересечении столбцов p и d указаны гидравлические диаметры насадок d_r .

Вторая серия экспериментов проведена с насадкой № 2, имеющей следующие параметры: $H_r = 5$ мм, $n = 16$; $D_k = 45$ мм; $k = 1,8$; $p = 0,8$; $d = 0,04$ мм.

Таблица I
Параметры насадок № I

$d, \text{мм}$ \ P	0,9	0,8	0,7	0,6
0,08	0,72	0,32	0,19	0,12
0,06	0,54	0,24	0,14	0,09
0,04	0,36	0,16	0,093	-
0,025	0,23	0,10	-	-

Испытания всех вариантов насадок проводили по одной программе в условиях, близких к условиям работы регенераторов в системе ДВРТ: цикличность $\omega = (5-30) \text{ с}^{-1}$; среднее давление рабочего тела $\bar{P} = 0,7 \text{ МПа}$ (единичные испытания проведены при $\bar{P} = 1,0 \text{ МПа}$), коэффициент давления $\delta = 0,1-0,24$; максимальная температура трубки нагревателя $T_{\text{max}} = 700 \text{ К}$.

Обработка результатов экспериментальных испытаний проведена на ЭВМ СМ-1021. Для насадок № I рассчитаны мгновенные значения коэффициентов гидравлических сопротивлений $\xi = \xi(Re)$ и средние за цикл и полуцикла значения эффективности регенератора $\bar{\mu}_c = \bar{\mu}_c(Re)$, коэффициенты теплоотдачи $\bar{\alpha} = \bar{\alpha}(Re)$ и числа $Nu = Nu(Re)$.

Погрешность определения коэффициентов гидравлических сопротивлений ξ - 18 %, чисел Nu - 32 %.

В пятой главе проведен анализ результатов расчетно-экспериментальных исследований насадок регенераторов.

На рис. 1, 2 представлены в качестве примера экспериментальные кривые изменения температур, давлений и перепадов давлений рабочего тела для насадок № I, температур и давлений для насадки № 2. Изменение температур рабочего тела с холодной стороны регенераторов (T_1) не превышает 2,5 К, с горячей стороны (T_2) для насадок № I лежит в пределах (5,5-8) К, для насадок № 2 достигает (60-80) К. Подобное различие в колебаниях температур можно объяснить воздействием соседнего ТА. Для насадок № I таким ТА является пористая теплоаккумулирующая масса с большим водяным эквивалентом и высокой поверхностью теплообмена. Со стороны горячего сечения насадка № 2 установлен трубчатый наг-

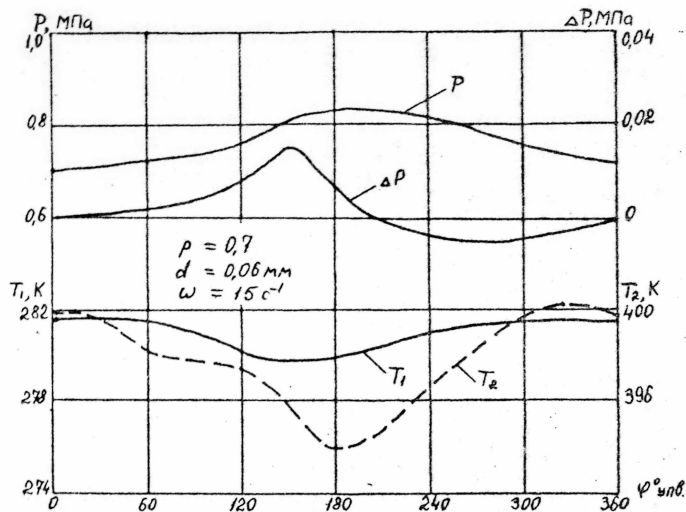


Рис. 1. Экспериментальные характеристики изменения параметров рабочего тела, полученные на насадке № 1

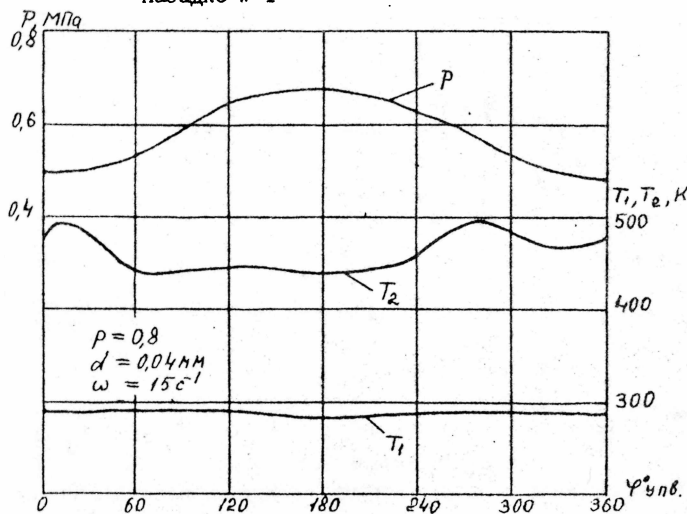


Рис. 2. Экспериментальные характеристики изменения параметров рабочего тела, полученные на насадке № 2

ревателю с малым значением эффективности. Колебания температуры рабочего тела на входе в насадку обуславливают аналогичные колебания температуры при обратной продувке. Последнее не позволяет оценивать мгновенные значения коэффициентов теплоотдачи без измерения мгновенных температурных напоров между насадкой и рабочим телом.

На рис. 3 представлено изменение температуры насадки № 2 по высоте регенератора. При изменении цикличности работы установки характер изменения температуры насадки сохраняется при неизменном отношении массовых расходов с холодной и горячей стороны регенератора. Там же нанесена кривая изменения температуры насадки, рассчитанная с учетом циклических пульсаций давления. Отклонение расчетной кривой от экспериментальной не превышает 20 %.

Анализируя кривую изменения мощности на проталкивание рабочего тела ΔN_r (рис. 4), можно отметить, что при числах $Re \leq 25-30$ потери работы на проталкивание, оцениваемые площадью под кривой ΔN_r , не превосходят 5 % от общей работы, следовательно, указанные участки цикла можно исключить из гидравлического расчета.

Анализ зависимостей $\xi(Re)$ показывает, что с увеличением диаметра проволоки насадки d или пористости ρ коэффициенты гидравлического сопротивления увеличиваются.

Отмечено, что коэффициенты гидравлических сопротивлений ξ при направлении течения рабочего тела от холодной стороны к горячей при повышении давления на 20 % выше значений ξ при обратном течении рабочего тела с понижением давления. Обобщенная зависимость $\xi(Re)$ может быть представлена в виде:

$$\xi = \frac{1020}{Re^{1,21}} \left(\frac{dr}{dro} \right) \quad (2)$$

где $d_{ro} = 0,1 \cdot 10^{-3}$ м; $Re = 0-200$.

Коэффициенты гидравлических сопротивлений, полученные при пульсирующем реверсивном потоке рабочего тела при малых числах Re в несколько раз превышает коэффициенты, полученные в условиях стационарных продувок. По мере увеличения числа Re происходит сближение значений коэффициентов гидравлических сопротивлений.

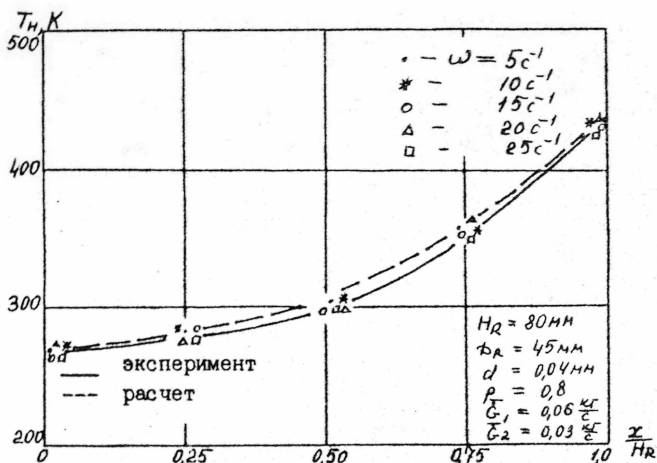


Рис.3. Изменение температуры насадки №2 по высоте регенератора

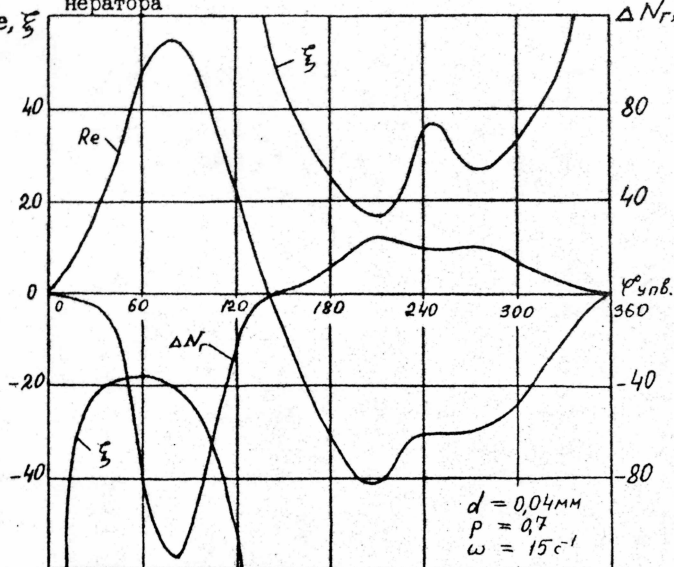


Рис.4. Результаты обработки экспериментальных данных по насадке №1

Значения средней эффективности исследуемых насадок находятся в пределах $\overline{\eta}_k = 0,99-0,997$. Учитывая высокую погрешность определения коэффициентов теплоотдачи по интегральным характеристикам, обобщенная формула $\overline{Nu}(\overline{Re})$ не отражает влияния на теплообмен пористости насадки ρ и диаметра проволоки d :

$$\overline{Nu} = 0,036 \overline{Re}^{0,41} \quad (3)$$

$$\overline{Re} = 10-100.$$

В сравнении с экспериментальными данными по теплообмену в насадках, полученных в условиях стационарных продувок, характеристика нестационарного теплообмена занимает промежуточное положение.

В пределах изменения параметров работы моделирующей установки при проведении экспериментов не отмечено влияние частоты пульсаций на характеристики теплообмена и гидравлических сопротивлений исследуемых насадок.

Полученные экспериментальные зависимости $\xi(\overline{Re})$ и $\overline{Nu}(\overline{Re})$ могут быть использованы для расчета характеристик регенераторов по отработанным квазистационарным методикам при внесении необходимых поправок, учитывающих характер изменения температуры насадки по высоте регенератора.

Предложенная методика расчета регенераторов ДВНТ позволяет проводить оптимизацию конструкции по суммарным потерям при изменении геометрических параметров насадки по высоте регенератора.

В ы в о д ы

1. Известные методы расчета регенераторов не учитывают ряд факторов, характеризующих работу регенераторов в системе двигателей с внешним подводом теплоты. Уточнение методов расчета регенераторов ДВНТ осложнено трудностями математического описания нестационарных процессов в каналах извилистой формы и отсутствием достаточных экспериментальных данных по теплообмену и гидравлическим сопротивлениям.

В качестве основного направления работы принято экспериментальное исследование теплообменных и гидравлических характеристик регенераторов на установке, моделирующей рабочие процессы в двигателях с внешним подводом теплоты.

2. Разработан и создан экспериментальный стенд, позволяющий исследовать теплогидродинамические процессы в теплообменных аппаратах в условиях пульсирующего реверсивного потока рабочего тела с моделированием в широких пределах изменения конструктивных и рабочих параметров двигателей с внешним подводом теплоты. Оригинальность конструкции стенда защищена двумя авторскими свидетельствами № 706557, 909258.

3. Разработана методика экспериментального исследования регенераторов, отличающаяся от существующих тем, что исследования проводятся в условиях циклических изменений давлений, температур, массовых расходов и направлений потоков рабочего тела.

4. В результате расчетных исследований насадок регенераторов, работающих в системе ДВРТ, показано, что:

- при задании величин относительного "мертвого" объема регенератора V_{sr} и снижения эффективности $\Delta \eta_e$, диаметр проволоки d , пористость p и высота регенератора H_R определяются однозначно из условия обеспечения минимальных суммарных потерь ΔN_z в насадке при известных рабочих параметрах двигателя;

- оптимизацию регенератора ДВРТ необходимо проводить с учетом закона изменения температуры насадки по высоте регенератора.

5. В результате проведения экспериментальных исследований различных вариантов насадок регенераторов на моделирующей установке и обработки результатов испытаний:

- показано, что амплитуда колебаний температуры рабочего тела на выходах из регенератора определяется не только значением эффективности последнего, а существенно зависит от характеристик работы соседних теплообменных аппаратов - нагревателя и холодильника;

- показано, что участки цикла с одновременным втеканием или вытеканием рабочего тела из насадки регенератора и характеризующиеся малыми значениями чисел Re можно исключить из гидравлического расчета регенератора, поскольку гидравлические потери при числах $Re \leq 25-30$ не превосходят 5 % от общих потерь за цикл;

- получены мгновенные значения коэффициентов гидравличес-

ких сопротивлений и средних коэффициентов теплоотдачи для вихревых насадок, изготовленных из путанки с диаметром проволоки $d = (0,025-0,080)$ мм и пористостью $\rho = 0,6-0,9$ при циклической работе установки $\omega = (5-30) \text{ с}^{-1}$ и коэффициенте давления $\delta = 0,1-0,24$.

6. Выведены обобщенные критериальные зависимости для расчета мгновенных коэффициентов гидравлических сопротивлений и средних коэффициентов теплоотдачи при изменении мгновенных чисел $Re = 0-200$ и средних чисел $\overline{Re} = 10-100$.

7. Показано, что циклическая работа установки и коэффициент давления не влияют на характеристики теплообмена, гидравлических сопротивлений и на закон изменения температуры насадок по высоте регенератора.

8. Предложена упрощенная методика расчета регенераторов, работающих в системе ДВНТ, использование которой на этапе проектирования позволит сократить объем и стоимость доводочных работ по созданию оптимальных конструкций регенераторов.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. А.с. 892000 СССР, МКИ⁸ G1G 1/04. Двигатель с внешним подводом теплоты / С.Т.Амандыков, И.В.Дикопов, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов (СССР). - № 2844763. Опубл. 23.12.81. Бюлл. № 47 // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. - 1981. - № 47. - С. 93.

2. Моделирующая установка для исследования теплообменных аппаратов двигателя Стирлинга / С.Т.Амандыков, И.В.Дикопов, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов // Машины, приборы, стенды: Каталог. - М.:Внешторгиздат, 1980. - С. 70.

3. Установка для исследования теплообменных аппаратов двигателей с внешним подводом теплоты / С.Т.Амандыков, С.И.Ефимов, И.В.Дикопов, Б.А.Крупнов // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1982. - № 12. - С. 144-146.

4. А.с. 706557 СССР, МКИ² G06 1/04. Термодинамическая модель двигателя с внешним подводом теплоты для исследования его теплообменных аппаратов / С.Т.Амандыков, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов (СССР). - № 2642780. Опубл. 30.12.79. Бюлл. № 48 // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. - 1979. - № 48. - С. 44.

5. А.с. 909258 СССР, МКП³ С2С I/04, СИМ I5/00. Термодинамическая модель двигателя с внешним подводом теплоты / С.Т.Амандыков, И.В.Диконов, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов (СССР). - № 2387867. Оpubл. 28.02.82. Бюлл. № 8 // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. - 1979. - № 8. - С. 82.

6. Амандыков С.Т., Ефимов С.И., Крупнов Б.А. Моделирование работы нагревателя на безмоторной установке // Двигателестроение. - 1983. - № 4. - С. 42-44.

7. Диконов И.В., Ефимов С.И., Крупнов Б.А. Стенд для определения утечки газа через поршневое уплотнение // ДВС. Реф. сб. - 1982. - № 4-82-18. - С. 10-13.

8. А.с. 1180713 СССР, МКП⁴ G 01L 23/00. I3.02. Устройство для индицирования рабочего процесса двигателя с внешним подводом теплоты / В.В.Арапов, И.В.Диконов, Б.А.Крупнов, В.С.Миронова (СССР). - № 3402995. Оpubл. 23.09.85. Бюлл. № 35 // Открытия, изобретения. - 1985. - № 35. - С. 82.

9. Теплообменные аппараты двигателей с внешним подводом теплоты: Справочная картотека / С.Т.Амандыков, И.В.Диконов, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов и др. - М.: ЦИТИС ИТЭМаш, 1980. - № 19-3-82. - 50 с.

10. Ефимов С.И., Петров А.И., Крупнов Б.А. Оценка распределения скоростей потока рабочего тела в регенераторе двигателя Стирлинга // Изв. ВУЗов. Машиностроение. - 1985. - № 12. - С. 76-78.

11. Ефимов С.И., Крупнов Б.А., Филиппов Н.Н. Расчетно-экспериментальное исследование насадок регенераторов ДВТГ // Перспективы развития комбинированных двигателей внутреннего сгорания и двигателей новых схем и на новых топливах: Тезисы докл. Всесоюзн. конф. - М., 1987. - С. 118.

Заказ 356. Подп. к печ. 4.11.89, Объем I п.л. Тираж 100 экз.
Л-18/43

Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана

