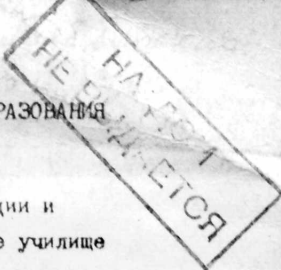


М 405831

МИНИСТЕРСТВО ВЫШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
С С С Р

Московское ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и
ордена Трудового Красного Знамени высшее техническое училище
имени Н.Э.Баумана



На правах рукописи

АМАНДЫСОВ Сайлау Табылдиевич

УДК 621.415

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ТЕПЛООБМЕНА В РЕГУЛИРУЕМЫХ
ТЕПЛООБМЕННИКАХ, РАБОТАЮЩИХ В СИСТЕМЕ ДВИГАТЕЛЯ
С ВНЕШНИМ ПОДВОДОМ ТЕПЛОТЫ

(05.04.02 - Тепловые двигатели)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1983г.

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской революции и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище им. Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор А.С.Орлин

Научный консультант - кандидат технических наук, доцент С.И.Ефимов

Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор В.А.Лурье

- кандидат технических наук, профессор А.И.Лущпа.

Ведущая организация - Физико-технический институт им. С.В.Стародубцева АН Уз.ССР,

Защита диссертации состоится "17" октября 1983г. в 14 час _____ мин. на заседании специализированного Совета К.053.15.05 "Тепловые машины и теоретические основы теплотехники" МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Лефортовская набережная, д.1, корпус факультета "Энергомашиностроение".

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Автореферат

Ваши соискатель просьба
высылать 1 экз. диссертации
МВТУ им. Н.Э.Баумана 1 экз. диссертации

специализированный кандидатский совет МВТУ им. Н.Э.Баумана имов С.И.

Л - 7465

Ротационный

М 405831

кз.

Д.5



1405831

Амандыков С. Т. Интенсификац

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

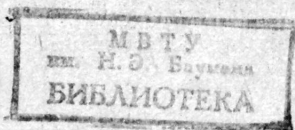
Актуальность проблемы. В материалах XXVI съезда КПСС подчеркивается необходимость создания новых энергопреобразователей, работающих на нетрадиционных и низкосортных топливах, и обладающих лучшими техническими, экономическими и экологическими характеристиками. Такими перспективными энергопреобразователями являются двигатели с внешним подводом теплоты (ДВТТ), работающие по циклу Стирлинга. Постановлением ГКНТ СМ СССР за № 420 от 22 ноября 1976 года была утверждена программа развертывания НИР и ОКР по созданию ДВТТ.

1405831

Одной из главных причин, сдерживающих дальнейшее развитие ДВТТ является несовершенство теплообменных аппаратов (ТА) внутреннего контура, работающих в нестационарном реверсивном режиме течения рабочего тела, в том числе рекуперативных ТА. Рекуперативные теплообменники, а именно нагреватель и охладитель, непосредственно участвуя в рабочем процессе двигателя, определяют величины количества теплоты, вводимой в цикл двигателя и отводимой от него, и, следовательно эффективные показатели ДВТТ. В условиях ограничений по механической и тепловой напряженности, требований к массогабаритным показателям двигателя, интенсификация теплообмена в рекуперативных ТА является наиболее эффективным средством повышения мощности и экономичности ДВТТ. Однако в настоящее время эти вопросы практически не исследованы, что существенно сказывается на развитии двигателей с внешним подводом теплоты. Систематизация научно-технической информации по ДВТТ подтвердила актуальность указанных задач.

Целью работы является теоретическое и экспериментальное исследование рекуперативных теплообменных аппаратов, работающих в системе ДВТТ и возможности интенсификации теплообмена в них, а также разработка по результатам исследований рекомендации по выбору наиболее эффективного способа интенсификации теплообмена, формы и рациональных геометрических соотношений интенсификаторов для создания компактных рекуперативных теплообменников (РТА) ДВТТ.

Методы исследований. При выборе направления работы и формировании цели и задач исследования использованы методы системного анализа научно-технической информации по ДВТТ (статистический и морфологический анализы, метод экспертных оценок).



Экспериментальная часть основана на методе физического моделирования условий работы РТА ДВТТ на специально созданной моделирующей установке. При обобщении экспериментальных данных применен метод теории подобия.

Расчетные исследования и обработка результатов экспериментов проведены на ЭВМ с применением алгоритмического языка Фортран-IV.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- установлены закономерности изменения теплообменных и гидродинамических характеристик рекуперативных теплообменных аппаратов (РТА) ДВТТ в условиях пульсирующего реверсивного течения рабочего тела ;

- уточнена методика расчета рекуперативных теплообменников, работающих в системе ДВТТ, учитывающая реальные условия их работы ;

- выявлены методы интенсификации теплообмена в РТА, работающих в системе ДВТТ в условиях пульсирующего реверсивного течения рабочего тела ;

- разработана и создана (с участием автора) экспериментальная моделирующая установка, позволяющая моделировать условия работы теплообменных аппаратов в системе ДВТТ и получать их характеристики в широком диапазоне изменения геометрических и режимных параметров двигателя.

Практическая ценность. Результаты исследований по интенсификации теплообмена в РТА ДВТТ и рекомендации могут быть использованы при создании высокоэффективных компактных теплообменников, позволяющих повысить эффективные показатели двигателя. Полученные в работе обобщенные характеристики и методика расчета РТА ДВТТ позволяют производить обоснованный выбор конструкции и геометрических размеров теплообменников на стадии проектирования, а также последующую оптимизацию всего теплообменного модуля (нагреватель-регенератор-охладитель) внутреннего контура двигателя в целом. При использовании разработанной экспериментальной моделирующей установки для заключительного этапа оптимизационных работ теплообменного модуля двигателя сокращаются затраты средств и времени на доводку сложных схем и мощностных рядов силовых установок с ДВТТ.

Реализация результатов работы. Основные результаты использованы при разработке нового поколения высокоэффективных теплооб-

менных аппаратов опытных ДВГТ в ряде организаций. В частности, использованы методика расчета и обобщенные характеристики РТА, работающих в системе ДВГТ, рекомендации по выбору метода интенсификации и обобщенные характеристики поверхностей с двухразмерной шероховатостью.

Экспериментальная установка используется в научно-исследовательской работе и в учебном процессе кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Апробация работы. Основные положения и отдельные разделы диссертационной работы доложены и получили одобрение на Всесоюзном научно-техническом семинаре по двигателям внутреннего сгорания (Москва, 1981), на Всесоюзной научно-технической конференции "Повышение эффективности использования автомобильного транспорта и автомобильных дорог в условиях жаркого климата и высокогорных районов" (Ташкент, 1982), на выездном заседании секции "Термодинамическое преобразование солнечной энергии" Научного Совета по использованию возобновляемых источников энергии в народном хозяйстве ГКНТ СССР (Ташкент, 1982), на XIII, XIV ежегодных научно-технических конференциях кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана (1981, 1982), на XLI научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ (Москва, 1983) и др.

Публикации. По результатам работ опубликовано 6 статей и получено три авторских свидетельства на изобретение.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, выводов, списка литературы и приложений. Объем диссертации - 146 страниц основного текста, 70 рисунков, 8 таблиц. Список использованной литературы включает 101 наименование:

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен анализ состояния работ по разработке РТА ДВГТ, дан обзор современного состояния исследований гидродинамики и конвективного теплообмена при переменном расходе рабочего тела, рассмотрены основные методы повышения интенсивности теплообмена в теплообменниках и сформулированы задачи исследования.

Систематизация зарубежного опыта проведена по патентным фон-

дам ведущих стран мира: США, Англии, Франции, ФРГ, Швейцарии, Японии и Голландии за последние 10-15 лет. Статистический анализ показал возрастающую интенсивность разработок в области ДВТТ. Морфологический анализ патентного массива показал, что наиболее актуальными задачами в анализируемом периоде были задачи повышения надежности и технологичности. Результаты анализа подтвердили, что наиболее значимыми элементами ДВТТ являются основные теплообменные аппараты внутреннего контура, в первую очередь, рекуперативные теплообменные аппараты. Результаты обобщения мнений специалистов ведущих организаций нашей страны, занимающихся созданием ДВТТ, обработанные методом экспертных оценок в основном совпали с результатами морфологического анализа.

Анализ литературы, а также технических решений, изложенных в патентах, показал, что для повышения удельных показателей двигателя применяются различные способы повышения интенсивности теплообмена.

Режим работы РТА в системе ДВТТ характеризуется изменением массовой скорости течения рабочего тела как во времени, так и по длине, аналогичным характером изменения давления, а также изменением направления движения (реверса) потока; при этом время процессов составляет сотые доли секунды.

На данном этапе развития ДВТТ отсутствует единое мнение по поводу характера течения рабочего тела в его РТА. В работах Иванченко Н.Н., Умарова Г.Я., Суслова А.Д. и др. для упрощения задачи принимается предположение о квазистационарности потока газа. Квазистационарные значения параметров находятся по критериальным уравнениям для стационарного течения. Имеющиеся теоретические и экспериментальные исследования нестационарного теплообмена по работам Леонтева А.И., Кошкина В.К., Галицейского Б.М. и др. указывают на возможные отличия нестационарного коэффициента теплоотдачи и сопротивления от квазистационарного. Опытами установлено, что это отличие может быть существенным. Однако, имеющиеся данные справедливы для условий, отличных от условий работы РТА ДВТТ, что не позволяет использовать их для расчета последних.

Анализ основных путей интенсификации теплообмена, а также обзор литературы по работам Калинина Э.К., Исаченко В.П., Гоме-лаури В.И. и др. позволил выявить приемлемые способы интенсификации теплообмена в РТА ДВТТ.

Основываясь на анализе предшествующих исследований, были поставлены следующие конкретные задачи работы:

- создание моделирующей установки для экспериментального исследования ТА ДВНТ, позволяющей моделировать условия их работы в системе ДВНТ;
- исследование характеристик трубчатых РТА ДВНТ в диапазонах изменения Re , соответствующих практически интересным геометрическим и режимным параметрам ДВНТ;
- разработка методики расчета РТА, работающих в системе ДВНТ;
- разработка методики оценки интенсивности теплообмена в РТА, работающих в системе ДВНТ;
- исследование выбранных способов интенсификации теплообмена в РТА ДВНТ;
- разработка рекомендации по выбору наиболее эффективного способа интенсификации теплообмена, рациональных форм и геометрических соотношений интенсификаторов.

Вторая глава посвящена расчетно-теоретическому исследованию теплообмена в РТА ДВНТ и возможности его интенсификации.

В инженерной практике наибольший интерес представляет не определение мгновенных изменений параметров в потоке теплоносителя, а определение средней температуры и давления в РТА ДВНТ, среднего теплового потока и средней температуры стенки, т.е. интересна оценка средних граничных условий для теплообменников. Поэтому, как реальный метод расчета, широкое распространение получил одномерный способ описания процессов теплообмена и гидродинамики с использованием средних коэффициентов теплоотдачи и сопротивления.

Известно, что критериальные уравнения среднего во времени конвективного теплообмена и гидродинамики пульсирующего потока жидкости с переменными физическими свойствами могут быть записаны в виде:

$$Nu, \xi = f(No, Re, Ga, Ec, Pe, M, L/d, T_w/T_f).$$

Оценкой величин и комбинацией ряда критериев подобия для условий теплообмена и гидродинамики в РТА ДВНТ выявлены два безразмерных параметра, определяющих влияние нестационарности на указанные процессы: Ec - критерий Эккерта и σ - безразмерный параметр частоты ($\sigma = d/2 \sqrt{\omega/\gamma}$), где d - диа-

метр, ω - частота пульсаций, ν - кинематическая вязкость). Расчетной оценкой диапазона изменения $\bar{G}$ в РТА ДВГТ в области практически интересных геометрических и режимных параметров двигателя установлено, что $\bar{G}$ изменяется в пределах 1,5-10.

Теоретическая оценка влияния Ec и $\bar{G}$ на рассматриваемые процессы представляет значительные трудности.

Анализ и обобщение экспериментальных работ по устойчивости пульсирующего реверсивного потока с учетом особенностей геометрических и режимных параметров РТА ДВГТ позволяет сделать вывод о наличии в потоке рабочего тела турбулентного режима в диапазоне изменений расхода по числу Рейнольдса $Re = 10^3 + 10^4$. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности теплообмена и гидравлического сопротивления в РТА в указанном диапазоне Re . Кроме того, как показывают экспериментальные данные, влиянием безразмерного параметра частоты на характер изменения теплогидравлических характеристик теплообменников при $\bar{G} = 1,5 + 10$ можно пренебречь. В то же время значительному снижению величины $\bar{G}$ ($\bar{G} \leq 1$) соответствует резкое увеличение устойчивости потока рабочего тела и, как следствие, снижение интенсивности теплообмена. Сопоставление экспериментальных данных, полученных другими исследователями, с результатами расчета с использованием критерияльных зависимостей для стационарных течений позволили предложить оценки для теплообмена при $Re = 10^3 - 10^4$. В частности, при $\bar{G} > 1$ теплообмен в указанном диапазоне Re может быть описан уравнением турбулентного теплообмена, а при $\bar{G} \leq 1$ интенсивность теплоотдачи снижается, приближаясь к квазистационарной.

Показано, что влияние критерия Ec на средний во времени теплообмен в идеальном случае, при симметричности термодинамических процессов расширения и сжатия в РТА ДВГТ пренебрежимо мало. А в реальных условиях это влияние может быть оценено путем проведения экспериментов при различных коэффициентах давления β , характеризующих степень повышения давления в рабочей полости двигателя. Коэффициент давления отражает влияние геометрических и кинематических параметров двигателя, а также температурного режима его работы на закономерность изменения давления.

Оценка влияния величины модифицированного критерия Био в РТА ДВГТ позволяет отнести взаимодействие пульсирующего реверсивного потока рабочего тела с теплообменной поверхностью к высокочас-

тотной области, т.е. в РТА температуры стенки T_w могут колебаться в незначительных пределах, в связи с чем этими колебаниями можно пренебречь. В работе показано, что сочетание указанного явления с реверсивностью потока рабочего тела обеспечивает значительную неравномерность распределения средней интегральной во времени температуры стенки по длине РТА, которую необходимо учитывать при расчетах теплообменников двигателя. Установлено, что неравномерность распределения температуры стенки по длине РТА зависит от схемы движения теплоносителей, от соотношения интенсивности теплоотдачи во внутреннем и внешнем контурах и снижает эффективность РТА ДВГТ.

Из рассмотрения уравнения теплового баланса стенки РТА ДВГТ определены поправочные коэффициенты, определяющие степень снижения эффективности теплообменников. Сопоставительный анализ показал возможность сведения методики расчета РТА ДВГТ к схеме расчета теплообменников со сложными схемами движения теплоносителей в стационарных условиях. При этом необходимо учитывать, что теплообменная поверхность РТА ДВГТ в два раза меньше, чем в указанных схемах. Необходимо также учитывать снижение эффективности за счет реверсивности движения рабочего тела и недорегенерацию тепла в регенераторе.

Известно, что интенсификация теплообмена в стационарном потоке в области переходного режима течения определяется двумя явлениями. Первое — это влияние турбулизаторов на снижение критического числа $Re_{кр}$. Второе — искусственная турбулизация потока со слабо развитой турбулентной структурой. Оба явления существенно зависят от высоты турбулизаторов и заметный эффект может быть получен только при $h/d \geq 0,08$.

Дополнительное снижение $Re_{кр}$ в пульсирующем реверсивном потоке усиливает оба эти явления. Таким образом, эффекты интенсификации теплообмена турбулизаторами типа двухразмерной шероховатости в ламинарном и переходном режимах в РТА ДВГТ в противовес стационарным течениям возможны и существенны и при $h/d < 0,08$, также как и при развитом турбулентном течении. Кроме того, указанные эффекты позволяют предположить справедливость закономерностей теплообмена для поверхностей с турбулизаторами в области развитого турбулентного течения и для областей течения в РТА ДВГТ в диапазоне $Re = 10^3 - 10^4$.

Для правильного выбора поверхностей теплообмена необходим

обоснованный метод их сравнения. Однако традиционные методы оценки эффективности интенсификации теплообмена не могут быть использованы для РТА ДВНТ, так как конструктивные размеры и параметры работы ТА внутреннего контура влияют на рабочий процесс двигателя.

Предложена методика сравнительной оценки эффективности теплообменных поверхностей в условиях их работы в системе ДВНТ, основанная на сравнении поверхностей при одинаковых термодинамических условиях. При этом сравнительный критерий энергетической эффективности показывает во сколько раз меньше потери мощности на прокачку рабочего тела в ТА с исследуемой поверхностью, по сравнению с исходной при обеспечении тех же термодинамических условий.

Третья глава посвящена описанию экспериментальной установки, моделирующей условия работы РТА в системе ДВНТ, экспериментальных участков, измерительной системы и методики проведения экспериментов, методики обработки результатов и оценке погрешностей определения основных величин.

С целью получения экспериментальных характеристик теплообмена и гидродинамики потоков рабочего тела в теплообменных контурах ДВНТ создана моделирующая установка, позволяющая исследовать модули или отдельные элементы теплообменных контуров в условиях, близких к работе этих элементов в ДВНТ, мощностью до 100 кВт. Принцип действия установки заключается в создании на входных участках теплообменных аппаратов периодических возмущений потока рабочего тела в результате преобразования динамического напора потока в потенциальную энергию давления.

Эксперименты проводились по схеме (рис. I) одностороннего входа рабочего тела из ramпы баллонов 7 в нагреватель 19, обогреваемого электрическим током, накопления рабочего тела в аккумулярующем объеме 24 после прохождения нагревателя и последующей разрядки аккумулятора. С обеих сторон нагревателя установлены охладители 4,27 и регенераторы 3,28 для снижения температуры рабочего тела перед золотником I и создания условий на входах, моделирующих граничные условия на двигателе. Пульсации давления и расхода создавались периодическим перекрытием воздушной магистрали вращающимся перфорированным диском в золотнике I. Для варьирования характером изменения давления и расходов перфорированные диски выполнены сменными с различными профилями впускных

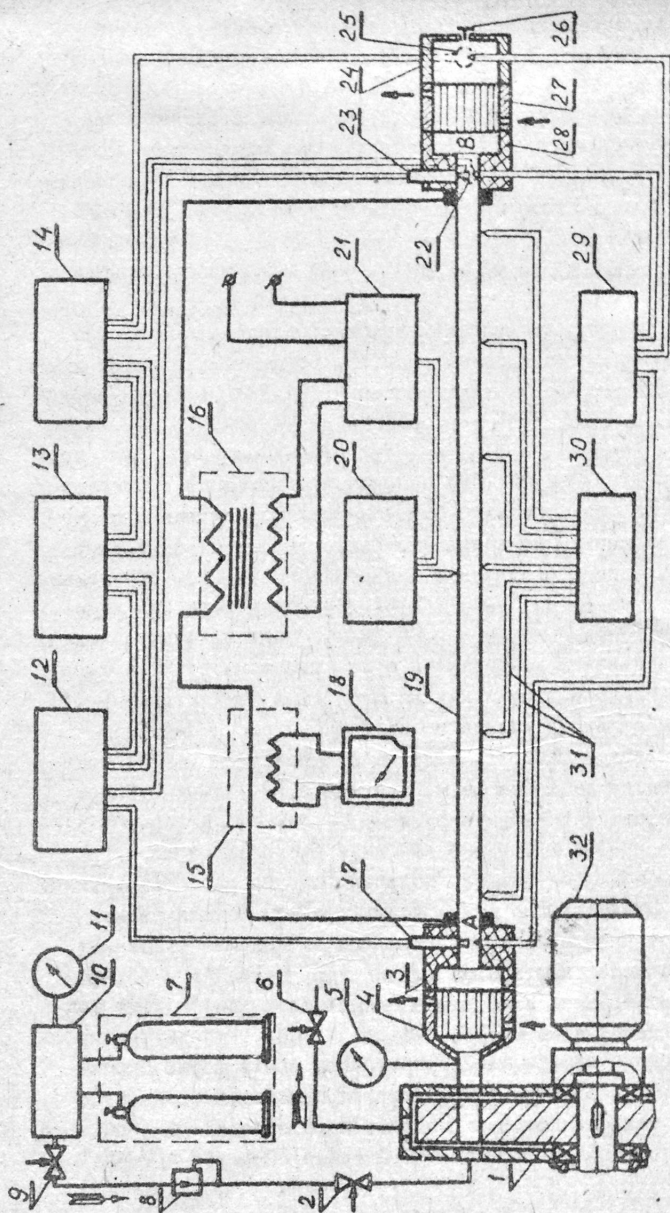


Рис. I Установка для моделирования условий работы РТА ДВНГ

1-золотник; 2, 6, 9-вентили; 3, 20-регенераторы; 4, 27-охладители; 5, 11-манометры; 7-ремня; 8-регулятор; 11-распределитель; 12-тензостанция; 13-осциллограф; 14-индикатор; 15, 16-трансформаторы; 17, 23-термометры сопротивления; 18-амперметр; 19-трубка нагревателя; 20, 29, 30-потенциометры; 21-регулятор; 22, 25-датчики давления; 24-аккумулирующий объем; 26-заглушка; 31-термометр; 32-электродвигатель.

и выпускных каналов.

Экспериментальные участки представляют собой трубки из нержавеющей стали $5 \times 0,375$ мм и 12×2 мм. Искусственная двухразмерная шероховатость в трубах $5 \times 0,375$ мм создавалась путем механической (дискретной и спиральной) накатки. Шероховатость представляла собой совокупность полукруглых поперечных выступов высотой $h = 0,1; 0,15$ и $0,2$ мм, расположенных на поверхности нагрева на расстоянии $S = 3$ мм друг от друга. Использован также проволоочный турбулизатор из хромеля диаметром $0,2$ мм и шагом размещения $S = 3$ мм на внутренней поверхности трубки $5 \times 0,375$ мм.

Тепловой поток в исследуемых трубках определялся по силе тока и активному сопротивлению участка. Средняя по времени температура потока на входах в нагреватель, а также в аккумулирующем объеме измерялась "ХА" термопарами диаметром $0,1$ мм. Температура стенки измерялась в пяти-шести точках по длине "ХК" термопарами диаметром $0,2$ мм. Для измерения мгновенной температуры потока T_c использовались термометры сопротивления с чувствительным элементом из вольфрамо-рениевой проволоки диаметром $0,015$ мм. Запись мгновенных давлений проводилась с помощью индуктивных датчиков давления ДДИ-21. Перепады давления измерялись дифференциальными датчиками ДДИ-1. Сигналы с датчиков температур и давления усиливались с помощью тензостанции ТА-5 и индикатора ИД-2И и выводились на шлейфовый осциллограф Н-115. Э.д.с. термопар фиксировались на потенциометрах КСП-4.

Массовый расход рабочего тела на стационарном режиме измерялся по перепаду давления на мерной шайбе, подключенной при помощи трубопровода к аккумулирующему объему 24 при снятой заглушке 26. Мгновенные и средние значения расходов через нагреватель на нестационарных режимах получены широко распространенным в практике ДВНТ косвенным методом, т.е. путем использования уравнения состояния идеального газа для вычисления указанных параметров по известным кривым температур, давлений и объемам.

Средний во времени и по длине нагревателя коэффициент теплоотдачи определялся по среднеарифметическому температурному напору, а средний коэффициент сопротивления - в форме Дарси-Вейсбаха. За определяющую температуру принималась средняя по длине нагревателя температура потока, а за определяющий размер - внутренний диаметр трубки. Расчетный тепловой поток принимался

постоянным вдоль всей поверхности нагрева.

Точность расчетного определения среднего во времени расхода рабочего тела определялась при помощи термоанемометра без температурной компенсации при холодных продувках экспериментального участка. В целом организация измерений первичных величин позволила рассчитать опытные значения коэффициентов теплоотдачи и сопротивления в стационарном потоке с погрешностью в пределах $2 \pm 5\%$, а в нестационарном пульсирующем реверсивном потоке - в пределах 20% .

В четвертой главе даны результаты экспериментальных исследований на моделирующей установке.

Установлено, что законы изменения давления и температур по концам нагревателя, полученные на моделирующей установке, близки к данным, полученным на двигателе. Сравнение характера изменения указанных параметров по углу поворота α диска (вала двигателя), для различных нагревателей при испытаниях с двумя дисками золотника с различными профилями впускных и выпускных каналов, показывает качественно аналогичную картину (рис.2). Четкая тенденция приближения кривых P и ΔT_{AB} на модели к данным на двигателе, указывает на возможность и количественного моделирования ТА двигателя при соответствующем подборе конструктивных элементов и режимов. Установка позволяет получить различные величины коэффициента давления ($\delta = 0,04 \div 0,379$), в широком диапазоне изменения частоты вращения диска и давления рабочего тела. Конструкция установки предусматривает возможность увеличения максимального давления до 10 МПа, а максимальной температуры до 1000 К.

Экспериментальные исследования теплоотдачи в стационарном потоке рабочего тела (воздух) при $Re \geq 10^4$ подтвердили известную зависимость для турбулентного режима течения:

$$Nu_{ст.} = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} E_{\psi} \quad (I)$$

где $E_{\psi} = (\bar{T}_w / \bar{T}_f)^{-0,55}$ при $\bar{T}_w / \bar{T}_f = 1,1 \div 1,4$.

В опытах по теплообмену и гидродинамике пульсирующего реверсивного потока рабочего тела основные параметры изменялись в следующих пределах: среднее во времени число Рейнольдса от 10^3 до $2,6 \cdot 10^4$, отношение температур $\bar{T}_w / \bar{T}_f = 1,1 \div 1,4$, частота

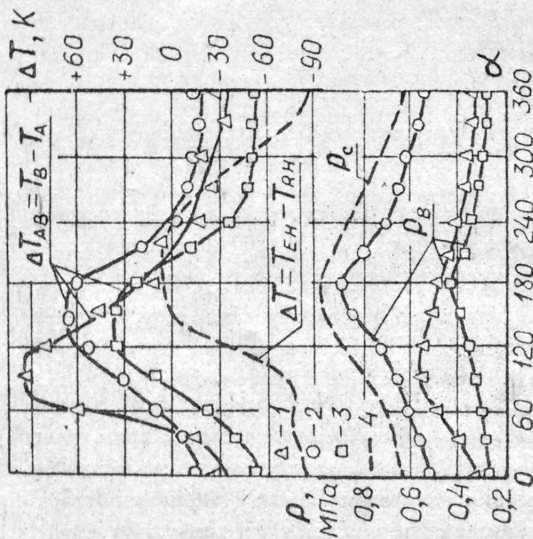


Рис. 2. Кривые изменения разности температур на входах в нагреватель.
Моделирующая установка, рабочее тело - воздух:
1- $\omega=150^\circ$, $\delta=0.259$ 1-диск; 2- $\omega=14$, 80° ,
 $\delta=0.227$; 3-диск; 4- $\omega=15$, 60° ; 5-диск;
2-диск, проволочный турбулизатор, $S/H=10$.
А и Б - входные сечения нагревателя (рис. 1).
Деталь, рабочее тело - гелий; 4- $\omega=100^\circ$,
 $\delta=0.19$, газовой угол 120° ; ЕН и ВН - входные
сечения нагревателя со стороны полости и ре-
генератора, p_c - давление в холодной полости.

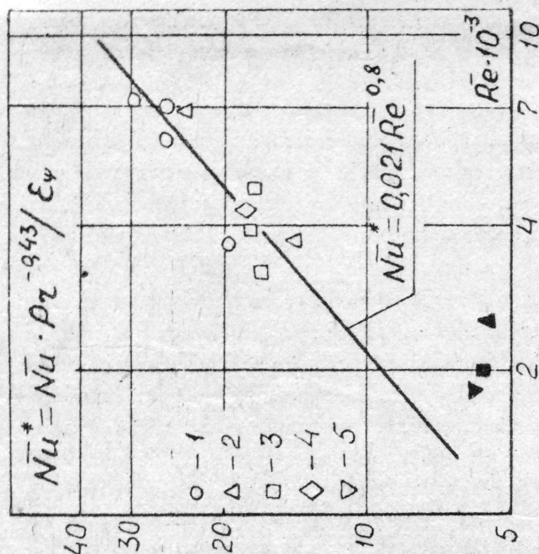


Рис. 3. Теплообмен в регенеративных теплообменниках дымового.
Рабочее тело - гелий, охладитель:
1- $\rho_c=5$ МПа, 2- $\rho_c=4$ МПа, 3- $\rho_c=3$ МПа;
4- $\rho_c=1$.
Данные других исследователей: рабочее
тело - азот, $\rho_c=0.8$ МПа; 4 - охладитель
 $\varepsilon_\psi=1$; 5 - нагреватель, $\varepsilon_\psi=(\bar{T}_w/\bar{T}_f)^{-0.55}$.
Светлые точки соответствуют $\phi > 1$,
зачерненные $\phi \leq 1$.

пульсации потока $\omega = 11,8 + 36 \text{ с}^{-1}$, коэффициент давления $\delta = 0,04 + 0,26$ и отношение L/d с учетом начального стабилизирующего участка $50 + 120$.

Результаты экспериментов, проведенных при $Re \geq 10^4$ показывают, что для расчета нестационарного теплообмена Nu в РТА двигателя в турбулентной области течения может быть использовано стационарное уравнение теплоотдачи (I), что совпадает с данными, полученными Хотиной Г.А. для РТА газо-холодильных машин, работающих по циклу Стирлинга.

Сопоставление зависимостей вида $Nu = f(Re)$, полученных для стационарного и пульсирующего реверсивного потоков рабочего тела позволило определить наличие турбулентного режима в диапазоне изменения $Re = 10^3 + 10^4$ и тем самым подтвердить результаты теоретического анализа.

В диссертации подробно изложены результаты опытов по определению теплогидравлических характеристик трубчатых РТА ДВРТ. Анализ результатов позволил подтвердить отсутствие влияния частоты ω и безразмерного параметра частоты G на указанные характеристики. Это же косвенно подтверждают данные по распределению температуры стенки по длине РТА. Анализ данных по теплообмену в зависимости от коэффициента давления δ , заметного влияния последнего не обнаружил. В результате обобщения опытных данных по теплообмену в пульсирующем реверсивном потоке рабочего тела установлено, что теплообмен (Nu) в диапазоне изменения $Re = 10^3 + 2,6 \cdot 10^4$ в пределах точности эксперимента может быть описан уравнением (I). Эксперименты по выявлению влияния радиуса кривизны R на теплообмен в изогнутых трубах на двух опытных участках ($d/R = 0,0567; 0,085$) показали, что при практических расчетах РТА ДВРТ допустимо использование уравнений для стационарного течения теплоносителей.

В результате обобщения экспериментальных данных по исследованию гидравлических характеристик получено уравнение

$$\bar{\xi} = 950 / Re \quad \text{при} \quad 10^3 \leq Re \leq 2,6 \cdot 10^4 \quad (2)$$

В диссертации представлены экспериментальные данные по теплообмену в стационарном и пульсирующем реверсивном потоках рабочего тела, данные по перепаду давления при $S/h = 15$ для исследованных типов двухразмерной шероховатости, а также теплогидравлические характеристики дискретно накатанных труб при $S/h = 15, 20, 30$.

В работе впервые показана возможность повышения интенсивности теплообмена при искусственной турбулизации потока в реверсивном

пульсирующем течении рабочего тела в РТА ДВГТ. Сопоставление данных, полученных на различных экспериментальных участках при $S/h = 15$ показали, что данные по теплообмену по существу совпадают между собой в пределах разброса экспериментальных точек, равного 15%, причем Nu_w в диапазоне изменения $Re = 10^4 + 2,6 \cdot 10^4$ практически совпадает со стационарным $Nu_{ст.ш}$, а в области $Re = 10^3 + 10^4$, Nu_w существенно выше, чем $Nu_{ст.ш}$. В части перепада давления лучшие характеристики имеют дискретно накатанные трубы.

В результате обобщения экспериментальных данных по теплообмену Nu_w в шероховатых трубах установлено, что для его описания во всем исследованном диапазоне Re может быть рекомендовано уравнение Гомелаури В.И. Данные по сопротивлению обобщены в виде зависимости:

$$\bar{\xi}_w = 1,9 \cdot 10^{-4} / \bar{Re} (S/h)^{-0,83} \quad \text{при } 15 \leq S/h \leq 30 \quad 10^3 \leq Re \leq 1,4 \cdot 10^4 \quad (3)$$

В турбулентной области данные по $\bar{\xi}_w$ в пределах погрешности эксперимента группируются вокруг кривых, полученных интерполяцией результатов экспериментов Калинина Э.К. и др.

В пятой главе приведены результаты сравнения экспериментальных данных по теплообмену в трубчатых РТА, полученных на моделирующей установке с данными, полученными на двигателе, и рекомендации по выбору высоты и шага размещения выступов в дискретно накатанных трубах.

Анализ данных, полученных на охладителе горячего макета ДВГТ (рис.3) подтвердил справедливость теоретических предпосылок настоящей работы и экспериментально установленных закономерностей по теплообмену в РТА ДВГТ.

На основе анализа характеристик дискретно накатанных труб с помощью разработанной методики сравнительной оценки интенсификации теплообмена рекомендовано использовать в РТА ДВГТ соотношения $S/h = 12 + 18$ как наиболее эффективные.

ВЫВОДЫ

I. Обобщением зарубежного опыта на основе анализа патентных фондов ведущих стран в области двигателей с внешним подводом теплоты, а также работ, ведущихся в нашей стране, выявлены наиболее актуальные проблемы, связанные с разработкой двигателей, а именно, проблемы повышения интенсивности теплообмена в теплообменных аппаратах.

2. Разработана и реализована в конструкции моделирующая установка для исследования теплообменных аппаратов двигателя (новизна подтверждена авторским свидетельством на изобретение).

Доказана возможность моделирования условий работы теплообменных аппаратов двигателя с внешним подводом теплоты в широком диапазоне изменения параметров рабочего процесса.

3. Обобщены известные результаты по устойчивости пульсирующего реверсивного течения и предложены оценки теплообмена в ламинарной и переходной областях в диапазоне изменения числа Рейнольдса $10^3 + 10^4$. Применительно к теплообменным аппаратам ДВНТ выявлены способы интенсификации теплообмена. Анализом физических особенностей взаимодействия реверсивного потока рабочего тела с поверхностью теплообмена установлена закономерность влияния реверсивности на эффективность рекуперативных теплообменников двигателя.

4. Получены обобщенные критериальные зависимости для расчета средних коэффициентов теплоотдачи и гидравлического сопротивления газа в трубчатых ПТА, работающих в системе ДВНТ в диапазонах изменения $Re = 10^3 + 2,6 \cdot 10^4$; $G = 1,5 + 10$ и $\delta = 0,04 + 0,26$.

Показано, что тепловые и гидравлические характеристики ПТА ДВНТ в пульсирующем реверсивном потоке рабочего тела существенно выше, чем в стационарном потоке в диапазоне $Re = 10^3 + 10^4$ и во всем исследованном диапазоне не зависят от безразмерного параметра частоты G и коэффициента давления δ .

5. Предложены методика расчета ПТА, работающих в системе ДВНТ, учитывающая реальные условия их работы, и методика сравнительной оценки эффективности поверхностей теплообмена в условиях их использования в системе двигателя.

6. Установлена возможность повышения интенсивности теплообмена в реверсивном пульсирующем потоке рабочего тела в ПТА ДВНТ путем использования двухразмерной шероховатости в диапазонах $Re = 10^3 + 2,6 \cdot 10^4$ и $S/h = 15$. Показано, что интенсификация теплообмена в пульсирующем реверсивном потоке в диапазоне $Re = 10^3 + 10^4$ возможна и существенна и при $h/d < 0,08$ в противовес стационарным течениям.

Установлено, что при равной интенсивности теплообмена в ПТА с двухразмерной шероховатостью типа дискретно- и спирально накатанных труб и труб с проволоочным турбулизатором ($S/h = 15$), дискретно накатанные трубы имеют лучшие гидравлические характеристики.

7. Исследовано влияние отношения шага размещения выступов шероховатости к высоте (S/h) на характеристики поверхностей с дискретно накатанной шероховатостью в диапазонах изменения $Re = 10^3 + 2,6 \cdot 10^4$ и $S/h = 15 + 30$ и рекомендовано использовать для РТА ДВТ $S/h = 12 + 18$ как наиболее эффективные.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. А.С.706557 (СССР). Термодинамическая модель двигателя с внешним подводом тепла для исследования его теплообменных аппаратов /С.Т.Амандыков, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов.— Опубл. в Б.И., 1979, № 40, с.119.

2. Ефимов и др. Моделирующая установка для исследования теплообменных аппаратов двигателя Стирлинга /С.И.Ефимов, И.В.Дикопов, Б.А.Крупнов, С.Т.Амандыков.— В кн.: Машины, приборы, стенды. Каталог /М.: МВТУ, 1980, № 7, с.70.

3. А.С.892000 (СССР). Двигатель с внешним подводом тепла /С.Т.Амандыков, И.В.Дикопов, С.И.Ефимов и др.— Опубл. в Б.И., 1981, № 47, с.161.

4. Амандыков и др. Определение состояния развития и первоочередных путей совершенствования двигателей с внешним подводом теплоты по анализу зарубежных патентов /С.Т.Амандыков, С.И.Ефимов, М.А.Файн.— Двигателестроение, 1982, № 1, с.47-50.

5. А.С.909258 (СССР). Термодинамическая модель двигателя с внешним подводом теплоты /С.Т.Амандыков, И.В.Дикопов, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов.— Опубл. в Б.И., 1982, № 8, с.171.

6. Амандыков и др. Теплообменные аппараты двигателей с внешним подводом теплоты /С.Т.Амандыков, И.В.Дикопов, С.И.Ефимов и др.— М.: ЦНИИТЭИТЯЖМАШ, 1982, № 19-13-82, карты 1-50.

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

8. Ефимов С.И., Амандыков С.Т. Оценка эффективности теплообменных поверхностей в двигателе с внешним подводом теплоты.— Изв.вузов. Машиностроение, 1983, № 3, с.103-106.

9. Амандыков и др. Моделирование работы нагревателя двигателя Стирлинга на безмоторной установке /С.Т.Амандыков, С.И.Ефимов, Б.А.Крупнов.— Двигателестроение, 1983, № 4, с.42-44.