М 311802

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М О С К О В С К О Е

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее

техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РЫБАКОВ Александр Юрьевич

ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

(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 - 1976

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М О С К О В С К О Е

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшее

техническое училище им. Н.Э.Баумана

На правах рукописи

РЫБАКОВ Александр Юрьевич

ИЗМЕРЕНИЕ МГНОВЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

(05.04.02 - Тепловые двигатели)

№ 311802

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана
1311802
Рыбаков А.Ю. Измерение мгн

Москва - 1976

Работа выполнена в Московском ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана экспериментальная часть - на заводе имени В.А.Дегтярева.

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки и техники РСФСР, доктор технических наук, профессор М.Г.Круглов

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор М.Г.Маханько,
кандидат технических наук, профессор И.Я.Райков

Ведущее предприятие: Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт двигателей (НИКТИД).

Защита диссертации состоится "___"_____ 1977 г. на заседании специализированного совета К 33/5 "тепловые машины и теоретические основы теплотехники" МВТУ им.Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просим высылать по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ им. Баумана.

Автореферат разослан "___"_____ 1976 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА
к.т.н., доцент Э.А.Манушин

Подп. к печ. 15/XII-76г. Объем 1 п.л. Тир.100 Тип.МВТУ
Зак. 25 Т-102055

МВТУ им. Н.Э. Баумана БИБЛИОТЕКА

ФУНДАМЕНТАЛЬНАЯ

Актуальность проблемы. XXV съездом КПСС перед отечественным двигателестроением поставлена задача организовать производство новых типов дизелей с прогрессивными технико-экономическими характеристиками. Решение этой задачи связано с необходимостью улучшения качества выпускаемых двигателей, с сокращением времени на их создание, с совершенствованием рабочего процесса и т.д. В частности, совершенствование рабочего процесса потребует существенного увеличения точности определения параметров двигателей, в том числе, замера мгновенных температур выпускных газов. Последнее может быть достигнуто путем усовершенствования методик измерения, учитывающих специфические особенности процессов в выпускной системе с одновременным снижением трудоемкости обработки результатов измерения.

Цель исследования. Настоящая работа является продолжением исследований путей повышения точности измерения мгновенных температур выпускных газов ДВС, проводимых в МВТУ им. Н.Э.Баумана на кафедре "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания". Она посвящена рассмотрению возможности совершенствования тепловой коррекции показаний термометра сопротивления путем автоматического ее осуществления с помощью аналоговой вычислительной машины (АВМ) и учета особенностей процессов, имеющих место в выпускной системе.

Методы исследования. Теоретические - для анализа возможности осуществления автоматической тепловой коррекции термоприемника в нестационарном газовом потоке. Экспериментальные - для исследования нестационарного теплообмена при обтекании цилиндрического термоприемника воздухом, вновь предложенной методики измерения мгновенной температуры выпускных газов и сравнение ее с существующими в настоящее время.

Научная новизна. Получены зависимости для определения температуры газа нестационарного потока, позволяющие осуществлять автоматическую тепловую коррекцию термометра сопротивления с помощью АВМ.

Разработана методика экспериментального исследования нестационарного теплообмена при внешнем обтекании цилиндрического термоприемника в ударной трубе с использованием волны разрежения. Показано, что влияние тепловой и скоростной нестационарностей на интенсивность теплоотдачи существенным образом сказывается лишь в начальный момент нестационарного теплооб-

мена.

Разработана методика экспериментального определения тепловой инерции проволочного термометра сопротивления в ходе проведения исследований, исключающая демонтаж датчика с места его установки.

Практическая ценность. Разработана методика измерения мгновенной температуры выпускных газов, обладающая меньшей трудоемкостью и более высокой точностью по сравнению с применяемыми в настоящее время методами. В связи с тем, что из-за загрязнения датчика его постоянная времени увеличивается, показана необходимость периодического контроля за величиной тепловой инерции одиночного термометра сопротивления при длительных измерениях мгновенной температуры выпускных газов. В работе предложена методика для осуществления подобного контроля.

Внедрение и реализация в промышленности. Разработанная в работе методика измерения мгновенной температуры выпускных газов с автоматической тепловой коррекцией термометра сопротивления внедрена на заводе им. В.А.Дегтярева.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на научно-технической конференции кафедры КДВС МВТУ им. Н.Э.Баумана в 1976г., на заседаниях технического совета завода им. В.А.Дегтярева в 1975-1976г.г.

Публикации. Основное содержание диссертационной работы отражено в четырех статьях.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав и выводов. Она содержит 127 страниц основного текста, 16 страниц иллюстраций, а также список использованной литературы, включающий 113 наименований.

Первая глава посвящена анализу существующих методов измерения мгновенных температур выпускных газов ДВС. Наиболее точно мгновенная температура выпускных газов измеряется с помощью термометра сопротивления. Основной погрешностью при этом является тепловая инерция термоприемника. Оригинальные решения для случая измерения мгновенной температуры выпускных газов предлагали отечественные и зарубежные исследователи: Н.Пфрим, Л.Я.Волчок, А.Г.Гордов, Р.Бенсон, М.Г.Круглов и И.М.Павлович, Б.Н.Лазурко и др.

Анализ работ по рассматриваемому вопросу позволил отметить следующие особенности.

Расчетные формулы для определения постоянной времени термоприемника носят ориентировочный характер. До сих пор не производилась оценка влияния закона теплоотдачи при внешнем обтекании термоприемника на величину тепловой инерции. Коэффициенты теплоотдачи, используемые при тепловой коррекции, рассчитываются из критериальных уравнений, полученных в стационарных условиях, которые отличаются от условий в выпускной системе ДВС. Изменение температуры и скорости потока в ней происходят довольно быстро, поэтому закономерности стационарного теплообмена в этом случае не применимы. Данные исследований интенсивности теплообмена в нестационарных режимах имеют противоречивый характер.

В результате изменения скорости потока постоянная времени термоприемника за цикл не остается постоянной величиной. Из опубликованных работ следует, что учет изменения скорости потока приводит к повышению точности измерений температуры. В условиях высоких температур и больших изменений скорости потока такие исследования не проводились.

Из существующих способов тепловой коррекции в условиях измерения нестационарной температуры выпускных газов наиболее точными и экспериментально проверенными являются методы двух (по схеме Н.Пфрима) и трех проволочек. В этих случаях точность полученных результатов измерения температуры газов зависит от точности определения производной $dT_{пр}/d\tau$. Применяемые в настоящее время способы определения $dT_{пр}/d\tau$ имеют неопределенную точность. Методы двух и трех проволочек отличаются значительной трудоемкостью. В связи с этим задача совершенствования методов обработки сигналов датчиков является актуальной.

Когда перед исследователем ставится вопрос о снижении погрешности измерения нестационарных температур газовых потоков, ему представляется альтернативный выбор – или уменьшение ошибки за счет применения различных электрических схем, или применение проволочки с малым диаметром (что не всегда выполнимо из-за недостаточной ее механической прочности).

На основании анализа литературы в настоящей работе были поставлены следующие задачи:

I. Исследовать влияние различных факторов, имеющих место в выпускной системе, на величину тепловой инерции термоприемника.

2. Экспериментально исследовать влияние тепловой и скоростной нестационарностей на интенсивность теплообмена цилиндрического термоприемника при внешнем обтекании его газовым потоком.

3. Разработать методику измерения мгновенной температуры выпускных газов, позволяющую производить автоматическую тепловую коррекцию сигналов термоприемника.

Во второй главе рассматриваются методы определения величины тепловой инерции проволочных термоприемников. Обычно расчет постоянной времени термоприемника $\mathcal{E}$ ведется по формуле

$$\mathcal{E} = \rho_{пр} c_{пр} \mathcal{D}_{пр} / 4\alpha , \qquad (1)$$

где $\mathcal{D}_{пр}, \rho_{пр}, c_{пр}$ – диаметр, плотность и теплоемкость материала проволочки; α – коэффициент теплоотдачи от газа к проволочке. Выражение (I) получено при допущениях, что тепловые потери в державки и радиационный теплообмен отсутствуют.

С учетом критериального уравнения $Nu = K Re^m$ получаем

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_{пр} c_{пр}}{4K} \cdot \frac{\nu^m}{\lambda} \cdot \mathcal{D}_{пр}^{2-m} \cdot \frac{1}{W^m} . \qquad (2)$$

При наличии радиационного теплообмена можно получить выражение:

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_{пр} c_{пр} \mathcal{D}_{пр}}{4(\alpha + 6\varepsilon' T_г^3)} . \qquad (3)$$

В последних выражениях: Nu и Re – критерии Нуссельта и Рейнольдса; ν , λ , W – кинематическая вязкость, теплопроводность и скорость газа; ε' , 6 – приведенный коэффициент черноты и постоянная Больцмана; m и K – постоянные коэффициенты.

Анализ выражения (3) показывает, что влияние излучения в общем случае приводит к уменьшению постоянной времени. Расчет показал, что величина второго слагаемого в знаменателе на один-два порядка меньше величины α . Следовательно, для расчета можно пользоваться формулой (2). Из нее следует, что величина тепловой инерции зависит от постоянных m и K, которые в свою очередь определяются принимаемым законом теплоотдачи от проволочки к газу. В табл. приведены формулы для расчета интенсивности теплоотдачи при внешнем обтекании шаров и цилиндров.

Наиболее общее эмпирическое выражение получил Н.Крамерс, который провел многочисленные опыты и обобщил данные многих исследователей.

По формуле (2) были рассчитаны зависимости постоянной времени вольфрамовой проволочки от ее диаметра и скорости потока

№	Расчетная формула	Обтекаемое тело	Автор
1	$Nu = 0{,}215\,Re^{0{,}62}$	Закрепленный шар	Л.Г.Лойцянский, Н.А.Шваб
2	$Nu = 0{,}54\,Re^{0{,}5}$	-"-	Вырубов Д.Н.
3	$Nu = 0{,}62\,Re^{0{,}5}$	-"-	Ляховский Д.Н.
4	$Nu = 0{,}42Pr^{0{,}2} + 0{,}57Pr^{0{,}33}Re^{0{,}5}$ $0{,}01 < Re < 10^4$	Одиночный цилиндр -"-	Н.Крамерс
5.	$Nu = 0{,}81\,Re^{0{,}4}$	-"-	М.А.Михеев
6	$Nu = 0{,}5Re^{0{,}5}Pr^{0{,}38}$ $0{,}1 < Re < 1 \cdot 10^3$	-"-	А.А.Жукаускас
7	$Nu = 0{,}024 + 0{,}56Re^{0{,}45}$	-"-	Коллис и Уильямс
8	$Nu = 0{,}891Re^{0{,}33}$ $1 < Re < 4$		
	$Nu = 0{,}821Re^{0{,}38}$ $4 < Re < 40$	-"-	Мак-Адамс
	$Nu = 0{,}615Re^{0{,}466}$ $40 < Re < 4 \cdot 10^3$		
9	$Nu = 0{,}52\,Re^{0{,}47}$	-"-	А.Н.Гордов
10	$Nu = 0{,}22\,Re^{0{,}6}$	-"-	С.С.Кутателадзе
11	$Nu = 0{,}766\,Re^{0{,}476}$ $37 < Re < 148 \cdot 10^4$	-"-	И.П.Пелепейченко и Симбирский Д.Ф.
12	$Nu = 0{,}178\,Re^{0{,}62}$	Закрепленный шар	И.Я.Бицотко и др.

при различных законах теплоотдачи от газа к проволочке. Наиболее близкие результаты получаются при расчете с использованием формул из таблицы (2), (4), (6), (7), (9). Систематических исследований теплоотдачи от цилиндрических проволок, по-видимому, не проводилось. Поэтому без тщательно поставленных опытов трудно отдать предпочтение одной из приведенных в таблице формул. Мы выбрали зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости типа корень квадратный, так как она отличается большей простотой и наиболее удобна при использовании в электронных схемах. Возможно, что это и не самое удачное эмпирическое соотношение. Для расчета постоянной времени термоприемника рекомендуется применять критериальное уравнение А.А.Жукаускаса. Тогда

$$\mathcal{E} = \frac{\rho_{пр} c_{пр}}{1{,}92} \frac{\nu^{0{,}5}}{\lambda} D_{пр}^{1{,}5} \frac{1}{w^{0{,}5}} \qquad (4)$$

Существующие экспериментальные способы определения $\mathcal{E}$ можно разделить на две группы: прямые и косвенные. При использовании прямых способов на термоприемник необходимо оказать температурное воздействие по определенному закону. Косвенные методы

предусматривают нагрев термоприемника различными способами (электрическим током и др.).

Фронт ступенчатого изменения входного воздействия по времени должен быть хотя бы на порядок меньше постоянной времени термоприемника. Для вольфрамовых проволочек диаметром 5-30 мкм требуется создание длительности фронта порядка десятитысячных долей секунды. В работе для определения ε проволочных термоприемников применялась ударная труба. В последней, во фронте ударной волны температура изменяется скачкообразно за 10^{-8} с. Реакция термоприемника на это изменение записывается на осциллографе и служит мерой величины постоянной времени. Общим недостатком прямых методов является сложность установок для создания изменения температуры потока по определенному закону.

Косвенные методы пока не получили должного распространения в отечественной практике. В работе использовался метод определения ε по реакции термоприемника на ступенчатое изменение протекающего по нему тока (фронт ступенчатого изменения тока составляет порядка 10^{-4}с). Кроме того, он позволяет определять ε без демонтажа датчика с двигателя.

В связи с тем, что сообщения исследователей по применению этого метода имеют противоречивый характер, было проведено его исследование на аэродинамической трубе разомкнутого типа. Воздух в трубе подогревался до 250°С с помощью двух кварцевых галогенных ламп КИ-220 мощностью по 1,5 квт. Результаты исследований показали, что данный метод по точности не уступает прямым способам.

При помощи этого способа было исследовано влияние загрязнения датчика на величину его тепловой инерции. За четыре часа работы двигателя постоянная времени термометра сопротивления, установленного в выпускном трубопроводе, возрастает более чем в два раза, как на дизеле, так и на карбюраторном двигателе. Следовательно, при применении одиночного термометра сопротивления для измерения выпускных газов необходимо проводить контроль за величиной его тепловой инерции.

<u>В третьей главе</u> приводятся результаты экспериментального исследования нестационарного теплообмена при внешнем обтекании цилиндрического термоприемника. Анализ литературы показал, что единое мнение по влиянию нестационарности на интенсивность теплоотдачи отсутствует. В ряде экспериментальных исследований

установлено, что отношение коэффициентов теплоотдачи, полученных в нестационарных и стационарных условиях достигает двух-трех единиц, в других - приближается к единице. Аналитические же исследования ограничиваются узким кругом работ и выполнены при допущениях не позволяющих сделать общие выводы.

Сложность эксперимента, а также методики обработки опытных данных накладывает существенный отпечаток на количественную сторону результатов исследования. Большинство работ, посвященных исследованию внешнего обтекания цилиндра, проводилось в различных условиях и не всегда отличались строгостью постановки опытов.

В работе разработана и экспериментально проверена методика исследования нестационарного теплообмена цилиндрического термоприемника в ударной трубе с использованием волны разрежения. Применение последней, в отличие от ударной волны не вызывает разрушения проволочек. В этом случае создавались одновременно температурная и скоростная нестационарности. Достоинством данной методики является то, что параметры газа кроме экспериментального определения, могут контролироваться расчетами.

Суть методики состоит в следующем. Исследуемая проволочка помещается в камере высокого давления. В одном сечении с ней устанавливаются датчики давления и скорости. Теория ударной трубы позволяет, имея диаграмму изменения статического давления, определить скорость потока, а следовательно, и число Нуссельта Nu в каждый момент времени, из критериальных уравнений. Нестационарный коэффициент теплоотдачи определяется из опытных данных.

Для исследования нестационарного теплообмена при внешнем обтекании цилиндра была сконструирована и изготовлена установка на базе ударной трубы. Длина камеры высокого давления равнялась 3м и низкого - 2,4 м. Сжатый воздух в трубу подавался из баллона. Разрежение создавалось вакуумным насосом и измерялось вакуумметром. Синхронизация запуска трубы и записи исследуемого процесса достигалась за счет специального блока синхронизации. На осциллограмме регистрировались давление, температура и скорость газа, а также температура проволочки.

Нестационарный коэффициент теплоотдачи для каждого момента времени определялся по формуле

$$\alpha_н = \frac{c_{пр}\,\rho_{пр}\,D_{пр}}{4\,(T_{пр} - T_г)}\,\frac{dT_{пр}}{d\tau}. \qquad (5)$$

Эта зависимость является приближенной. Однако малый диаметр проволочки позволяет считать, что погрешность в этом случае будет небольшой вследствие малости критерия Био. Результаты опытов сравнивались с коэффициентами теплоотдачи, определяемыми из критериальных уравнений А.А.Жукаускаса, а также Коллиса и Вильямса.

Опыты проводились при поперечном обтекании вольфрамовых проволочек диаметром 15,20 и 23 мкм. Проволочки подключались по полумостовой схеме к тензометрическому усилителю ТА-5. Последний обеспечивал хорошую чувствительность схемы к изменению температуры потока во всех наших опытах. Все процессы записывались на шлейфовом осциллографе Н-115 при помощи гальванометров с собственной частотой колебаний 2500 гц. Тщательная тарировка до и после каждой серии опытов позволяла проводить измерения температур Тпр проволочки и Тг газов достаточно точно. Значения температур газа, полученных теоретическим и экспериментальным путем практически совпадали. Максимальная относительная погрешность определения нестационарного коэффициента теплоотдачи не превышала 6-8%.

В ходе экспериментального исследования теплообмена цилиндра при наличии скоростной и тепловой нестационарностей установлено, что нестационарный коэффициент теплоотдачи $\alpha_н$ в начальный период охлаждения существенно выше квазистационарного значения коэффициента теплоотдачи α_0. Затем разница между ними уменьшается и величина $\alpha_н/\alpha_0$ приближается к единице. Например, при диаметре цилиндра 23, 20 и 15 мкм нестационарная теплоотдача превышала квазистационарное значение в 1,5-2 раза в начальный период процесса. Результаты исследования показывают, что с ростом Re влияние нестационарностей на интенсивность теплоотдачи уменьшается. Качественная картина изменения интенсивности теплообмена совпадает с результатами работ, проведенных в МАИ и ИТМО АН БССР.

Влияние тепловой и скоростной нестационарностей на интенсивность теплообмена существенным образом сказывается лишь в начальный период теплообмена. Этот период характеризуется изменением критерия Но от 0 до $2{,}5 \cdot 10^3$. При измерении мгновенной температуры выпускных газов термометром сопротивления значения критерия Но лежат значительно выше указанной области. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о возможности использования

для расчета теплоотдачи при обработке температурных осциллограмм критериальных уравнений, полученных в стационарных режимах.

В четвертой главе проводится теоретическое исследование возможности автоматической коррекции тепловой инерции термометра сопротивления с помощью аналоговой вычислительной машины. Рассматривалось два варианта-коррекция с учетом и без учета изменения скорости потока. В первом случае была принята схема датчика, состоящего из двух проволочек. Одна работает в режиме термометра сопротивления, а другая - в режиме термоанемометра постоянной температуры.

Температура газов при измерении ее термометром сопротивления

$$T_г = T_{пр} + \frac{\rho_{пр} c_{пр} \nu^m D_{пр}^{2-m}}{4 K \lambda w^m} \frac{dT_{пр}}{d\tau} . \qquad (6)$$

Решение системы двух уравнений для теплового баланса проволочки, работающей в режиме термоанемометра, в случае движущегося и неподвижного газа при общепринятых допущениях позволяет получить выражение для определения скорости потока в виде

$$Re^m = \frac{JR}{K \pi l_т \lambda} \frac{I^2 - I_0^2}{T_т - T_г} , \qquad (7)$$

где I , I_0 - ток, протекающий по нити термоанемометра в случае движущегося и неподвижного газа; R , $T_т$, $l_т$ - электрическое сопротивление, температура и длина нити термоанемометра; J - электротепловой эквивалент.

Совместное решение уравнений (6) и (7) при допущении равенства коэффициентов теплоотдачи от проволочки к газу ($\alpha_{пр}$) и от нити термоанемометра к газу ($\alpha_т$) позволяет связать выходные сигналы термоанемометра и термометра сопротивления в виде

$$T_г = T_{пр} \left[1 + \frac{T_т}{T_{пр}} A \frac{dT_{пр}/d\tau}{(I^2 - I_0^2)R} \right] \left[1 + A \frac{dT_{пр}/d\tau}{(I^2 - I_0^2)R} \right]^{-1} , \qquad (8)$$

где $A = \pi \rho_{пр} c_{пр} D_{пр}^2 l_т / 4J$ - постоянный коэффициент.

Для расчета температуры газа по этому выражению предлагается использовать аналоговую вычислительную машину (АВМ), которая за счет более точного определения производной $dT_{пр}/d\tau$ позволяет снизить погрешность определения Тг и значительно сократить трудоемкость измерения по сравнению с существующими методами. Ошибка предположения $\alpha_{пр} = \alpha_т$ по расчетам, приведенным в работе, составляет около 10%. Величина температурной поправки при этом оказывается весьма малой. При частоте вращения коленчатого вала 60 сек$^{-1}$ температурная поправка составляет уже значительную

величину, поэтому допущение о равенстве $\alpha_{пр}$ и $\alpha_т$ в этом случае становится некорректным.

В процессе программирования уравнение (8) приводилось к виду, удобному для реализации на АВМ. В результате преобразований потребность в блоках деления сведена до одного, что привело к увеличению точности расчета.

Выходное напряжение термоанемометра в сильной степени зависит от температуры газового потока. Это следует из формулы (7) Решение (7) совместно с (8) позволяет получить выражение для Re^m с учетом температурной компенсации по показаниям термометра сопротивления

$$Re^m = \frac{BR(I^2-I_0^2)}{T_т - T_{пр}}\left[1 + A\frac{dT_{пр}/d\tau}{(I^2-I_0^2)R}\right]. \qquad (9)$$

Следовательно, имея аналоговый контур, реализующий уравнения (8) и (9) можно одновременно производить автоматическую тепловую коррекцию термоприемника с учетом изменения скорости потока и температурную компенсацию при измерении скорости потока. В работе для реализации уравнений (8) и (9) на АВМ разработаны структурные схемы.

Для автоматической коррекции тепловой инерции при измерении мгновенной температуры выпускных газов без учета изменения скорости потока были разработаны структурные схемы для следующих уравнений:

$$T_г = T_{пр} + \varepsilon\frac{dT_{пр}}{d\tau} \qquad (10)$$

и

$$T_г = \frac{T_{пр1}\left(C\,dT_{пр2}/d\tau - T_{пр2}\,dT_{пр1}/d\tau\right)}{C\,dT_{пр2}/d\tau - dT_{пр1}/d\tau}, \qquad (11)$$

где $C = \left(\frac{D_{пр2}}{D_{пр1}}\right)^{2m}$; $D_{пр1}$, $D_{пр2}$ – диаметры первой и второй проволочек.

В результате проведенных в этой главе исследований показана возможность осуществления автоматической тепловой коррекции проводочного термометра сопротивления с помощью аналоговой вычислительной машины.

Пятая глава отведена вопросам экспериментальной проверки предложенных методик измерения мгновенной температуры выпускных газов, рассмотренных выше, а также сравнение их с существующими методиками. Апробирование разработанных методик измерения нестационарной температуры выпускных газов производилось на дизеле 1Ч8,5/11 и двухтактном, карбюраторном мотоциклетном двигателе "Восход-3". Вследствие того, что последний двигатель работает в

широком диапазоне чисел оборотов, оказалось возможным более полно выявить возможности предлагаемых методик.

Измерение мгновенной температуры выпускных газов осуществлялось по трем основным схемам.

I. По схеме, предложенной Н.Пфримом записывались одновременно изменения температуры двух проволочек диаметром I5 и 20 мкм. Обработка выходных сигналов производилась обычным способом.

2. По методу Н.Пфрима с обработкой выходных сигналов датчиков на АВМ МН-7М.

3. При применении датчика, состоящего из двух проволочек. Одна работала в режиме термоанемометра, другая - в режиме термометра сопротивления. Обработка выходных сигналов производилась на АВМ МН-7М.

Схемы 2 и 3 разработаны на кафедре "Двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им. Н.Э.Баумана.

Сравнивать результаты измерения мгновенной температуры выпускных газов поочередным использованием различных датчиков практически невозможно из-за неповторимости рабочих циклов. Поэтому был изготовлен трехпроволочный датчик, одна проволочка которого работала в режиме термоанемометра, а две другие - в режиме термометра сопротивления. Следовательно, записывая значения $T_{прI}$, $T_{пр2}$ и I, можно одновременно эти сигналы обработать следующими способами: I)методом Н.Пфрима; 2) тоже с использованием АВМ; 3) одновременным измерением $T_г$ и скорости потока с применением АВМ; 4) методом одной проволочки; 5) введением $\mathcal{E}$ в уравнение (I0) на АВМ.

Для индицирования давления в цилиндре двигателя применялись индуктивные охлаждаемые датчики ДДИ-2I, а в выпускном трубопроводе - ДИИ, которые устанавливались в охлаждаемом корпусе. Для измерения скорости выпускных газов применялся термоанемометр фирмы "Диса". Нить датчика изготавливалась из вольфрам-рениевого сплава, который имеет механические свойства на уровне вольфрама и не окисляется до температуры 1173°. Тарировка термоанемометра производилась на специальной установке, в которой воздух нагревался до температуры 473°К, и на ударной трубе.

При измерении температуры по схеме 3 при $n = 50\ с^{-I}$ максимальное различие между показаниями проволочки $T_{пр}$ и скорректированным значением $T_г$ составляло 325°К. Фазовый сдвиг между

ними равнялся 9-12 градусам угла поворота коленчатого вала.

При измерении на каждом режиме получали записи изменения $T_{пр}$, $T_г$, w и давление в цилиндре в 12-15 последовательных циклах. Максимальное изменение давления в цилиндре от цикла к циклу, судя по осциллограммам не превышала 3-4%, что несколько выше суммарной ошибки измерения. В случае $T_г$ и $T_{пр}$ изменение не превышало 4%. Следовательно, зарегистрированные изменения температуры выпускных газов от цикла к циклу следует считать характерной особенностью двигателя.

Обработка показаний двух проволочек по методу Н.Пфрима дает большее отклонение $T_г$ от цикла к циклу, достигающее 9-12%. При измерении двухпроволочным термометром сопротивления с помощью АВМ в тех же циклах разброс достигает 6-7%, а трехпроволочным - 5-7% при $n = 50 с^{-1}$. При $n > 50 с^{-1}$ эти значения несколько увеличиваются, достигая соответственно, 10-14, 7-8, 8-9%. Такой разброс экспериментальных данных $T_г$ не может быть объяснен только характерной особенностью двигателя. В этих случаях очевидно увеличение методических погрешностей.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что методика одновременного измерения температуры и скорости выпускных газов дает большую точность по сравнению с другими рассмотренными методами. Этот вывод ограничивается режимом работы двигателя до $60 с^{-1}$. Измерение двухпроволочным термометром сопротивления с АВМ обладает меньшей методической погрешностью по сравнению с методом двух и трех проволочек. Преимущество первого перед последними усиливается с ростом частоты вращения коленчатого вала. Расчет, проведенный в работе показал, что при прочих равных условиях относительная погрешность измерения мгновенной температуры при $n = 41 с^{-1}$ равняется при использовании методов двух проволочек - 20%, трех проволочек - 13%, схемы II - 8%, схемы III - 6%.

Методика однопроволочного термометра сопротивления с введением в уравнение (10) заранее определенного значения постоянной времени термоприемника дает достоверные результаты на режимах при частоте вращения $n \leq 20 с^{-1}$ при $D_{пр} = 15$ мкм и $n \leq 13 с^{-1}$ при $D_{пр} = 20$ мкм.

Измерение двух- и трехпроволочным термометрами сопротивления дает удовлетворительную точность измерения при частоте вращения $n < 43 с^{-1}$. При более высокой частоте вращения

результаты измерения существенно отличаются от действительной картины изменения температур выпускных газов.

Применение двухпроволочного термометра сопротивления с АВМ оказалось эффективным до 66 c^{-1}. Дальнейшие измерения оказались невозможными вследствие шумов, возникающих в операционных усилителях АВМ.

ВЫВОДЫ

Одной из важнейших задач при измерении нестационарной температуры выпускных газов с помощью термометра сопротивления является сложность учета тепловой инерции термоприемника.

I. В работе дано теоретическое решение задачи о коррекции тепловой инерции проволочки, позволяющее получить с помощью аналоговой вычислительной машины диаграмму изменения температуры потока по времени непосредственно на осциллограмме.

Разработанная методика позволяет производить автоматическую тепловую коррекцию однопроволочного и двухпроволочного термометров сопротивления с учетом и без учета изменения скорости потока.

2. Подход, предложенный в работе, позволил создать методику измерения мгновенной температуры выпускных газов, обладающую меньшей трудоемкостью и более высокой точностью по сравнению с известными в литературе методиками.

В ходе исследований разработаны и экспериментально проверены следующие методики:

- определения постоянной времени термометра сопротивления без его демонтажа с двигателя с помощью изменения электрического тока, подаваемого на проволочку, и на ударной трубе;
- изучения нестационарного теплообмена при внешнем обтекании цилиндрического термоприемника с использованием волны разрежения на ударной трубе;
- измерения скорости выпускных газов с температурной компенсацией нити термоанемометра постоянной температуры на аналоговой машине МН-7М;
- измерения давления в цилиндре и выпускном трубопроводе мотоциклетного двигателя "Восход-3" с помощью индуктивных датчиков ДДИ-21 и ДМИ.

3. Показано, что в случае внешнего обтекания цилиндрического термоприемника при наличии тепловой нестационарности коэффициент теплоотдачи отличается от квазистационарного; при этом отношение $\alpha_н/\alpha_0$ изменяется в пределах 0,98-I,07. При наличии скоростной

и тепловой нестационарностях коэффициент теплоотдачи цилиндрического термоприемника также отличается от рассчитанного квазистационарным методом. С ростом числа R_e влияние нестационарности уменьшается.

4. Измерения, проведенные по разработанной методике на двухтактном двигателе "Восход-3" позволили установить следующее.

Одновременное применение термометра сопротивления и датчика скорости потока с обработкой получаемых сигналов на аналоговой машине МН-7М повышает точность и снижает трудоемкость измерения мгновенной температуры выпускных газов.

Обработка результатов измерения двухпроволочным термометром сопротивления на аналоговой вычислительной машине МН-7М позволила получить более высокую точность по сравнению с методами Н.Пфрима и трех проволочек. Это обеспечило эффективность проведения экспериментальных исследований при настройке выпускной системы двигателя.

Максимальная температура выпускных газов с ростом частоты вращения коленчатого вала от 33 до 83 $с^{-1}$ повышается от 491°К до 84I°К.

5. В связи с тем, что из-за загрязнения датчика его постоянная времени увеличивается, необходимо периодически контролировать величину тепловой инерции одиночного термометра сопротивления при длительных измерениях мгновенной температуры выпускных газов.

6. Результаты исследований внедрены на Ковровском мотоциклетном заводе им. В.А.Дегтярева.

По материалам диссертации опубликовано:

I. Горнушкин Ю.Г., Рыбаков А.Ю. Высокочастотный датчик малого давления. "Автомобильная промышленность", 1970, №5.

2. Горнушкин Ю.Г., Рыбаков А.Ю. Методы изготовления и крепления термопар к деталям. НИИИНФОРМТЯЖМАШ-ДВС, 1975, №I.

3. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Рыбаков А.Ю. Измерение температур в двигателях внутреннего сгорания. НИИИНФОРМТЯЖМАШ-ДВС, 1975, №2I.

4. Круглов М.Г., Рыбаков А.Ю. Об измерении нестационарной температуры выпускных газов двигателей внутреннего сгорания. "Известия ВУЗов. Машиностроение", 1976, №6.