

М 130-192

НА ДОМ  
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

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

---

**Л. М. ПАВЛОВИЧ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
МГНОВЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВЫПУСКНЫХ ГАЗОВ  
В БЫСТРОХОДНОМ ДВИГАТЕЛЕ ВНУТРЕННЕГО  
СГОРАНИЯ**

**(05.190. Тепловые двигатели)**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**



В настоящее время газотурбинный наддув является одним из основных средств повышения удельной мощности и экономичности двигателей внутреннего сгорания.

Применение газотурбинного наддува двигателей внутреннего сгорания более остро поставило вопрос об определении параметров выпускных газов перед турбиной турбокомпрессора.

Определение параметров выпускных газов двигателей внутреннего сгорания и особенно температуры связано с большими трудностями, которые усугубляются при использовании энергии выпускных газов в турбине с переменными параметрами на входе. В связи с этим в последние годы большое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям температуры выпускных газов.

Параметры выпускных газов в быстроходных двигателях изменяются в широких пределах с высокой частотой пульсаций. Температура выпускных газов изменяется по величине от температуры, соответствующей температуре газов в цилиндре в начале выпуска, до температуры, близкой к температуре наддувочного воздуха. Существующие методы теоретического решения этой задачи громоздки и не обеспечивают достаточной точности решения. Поэтому в настоящее время получили развитие экспериментальные методы определения мгновенной температуры выпускных газов.

Настоящая работа посвящена созданию достаточно обоснованной методики измерения мгновенной температуры выпускных газов в быстроходном двигателе внутреннего сгорания; совершенствованию техники проведения эксперимента (измерительная схема, аппаратура, датчики, методика тарирования и расшифровки температурных осциллограмм); проведению по разработанной методике экспериментальных исследований мгновенной температуры выпускных газов в быстроходном двухтактном двигателе 4Д 18/14 в широком диапазоне изменения его скоростных и нагрузочных режимов работы.

Работа состоит из четырех глав:

в первой главе дан краткий анализ состояния экспериментального определения мгновенной температуры выпускных газов; дается обоснование и постановка задачи исследования;

во второй главе приводятся основные положения методики, подробный теплофизический анализ метода двух и трехпроводного термометра сопротивления и возможности использования показаний многопроводного термометра сопротивления для определения

мгновенной скорости газового потока; рассматриваются области применения метода;

в третьей главе приводится описание экспериментальной установки, измерительной аппаратуры; дана методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных; освещены вопросы точности измеряемых величин;

в четвертой главе рассмотрены результаты экспериментальных исследований параметров газа в выпускной системе в зависимости от параметров рабочего процесса двигателя 4Д 18/14; дан анализ изменения импульса температуры выпускных газов в зависимости от режима работы двигателя; приведен статистический анализ температурного импульса в выпускной системе быстроходного двухтактного двигателя 4Д 18/14.

#### Экспериментальное определение температуры выпускных газов

Существующие методы экспериментального определения мгновенной температуры выпускных газов могут быть разделены на две основные группы: первая - косвенные методы определения мгновенной температуры, вторая - контактные методы измерения температуры.

Косвенное определение мгновенной температуры возможно по скорости распространения звука в газе и по скорости распространения волны конечной амплитуды в выпускном трубопроводе (последний способ предложен в МВТУ им.Баумана). Эти методы имеют то преимущество, что термометрическим элементом служит сам газ; их можно отнести к классу безинерционных методов. Недостатком их следует считать то, что определяется средняя в объеме мгновенная температура.

Контактные методы основаны на использовании проволочных датчиков, помещаемых в газовый поток. Эти методы менее сложны. Их основным недостатком является тепловая инерция термоприемника. Для уменьшения тепловой инерции применяют наиболее тонкую проволоку (диаметром  $0,006 \pm 0,03$  мм). Минимальный диаметр проволоки ограничивается допустимой механической прочностью. Проволочными датчиками могут быть термопары и термометры сопротивления. В измерительной практике нестационарных тепловых потоков предпочтение отдают термометрам сопротивления. При одинаковой толщине проволоки термопара имеет большую тепловую инерцию и меньшую прочность, чем термометр сопротивления. Усиление термотока термопары представляет большие трудности, чем усиление переменного

2.

тока в термометре сопротивления. Кроме того, погрешности измерения, обусловленные тепловой инерцией измерительной проволоки термометра сопротивления, могут быть проанализированы с помощью теории теплопроводности (на основе решения задачи о "бесконечном цилиндре").

При исследовании быстроменяющихся тепловых процессов, имеющих место в выпускной системе быстроходных двигателей внутреннего сгорания, пренебрежение ошибкой в показании термоприемника, обусловленной тепловой инерцией, дает большие погрешности в измерении.

В работах Г.М.Кондратьева, А.Н.Гордова, Л.Я.Волчка и других авторов, посвященных исследованиям быстроменяющейся температуры контактными методами, рассматриваются случаи проявления тепловой инерции, соответствующие определенным законам изменения температуры среды, и даны зависимости между температурой чувствительного элемента и температурой измеряемой среды.

Температура выпускных газов в двигателях внутреннего сгорания меняется по сложному закону, который пока не удается выразить аналитически. Кроме того, коэффициент теплоотдачи изменяется с изменением параметров газовой среды. Выразить аналитически связь между температурой чувствительного элемента датчика и температурой газового потока не представляется возможным. Поэтому наилучшие результаты дают методы учета тепловой инерции, в которых используется само уравнение теплообмена, а не его решение — методы двух и трех проволочек. Однако до настоящего времени не были решены важные вопросы, связанные с применением многопроволочных термоприемников: измерение при малых числах  $Re$  ( $Re < 10$ ), которые могут иметь место при обтекании тонких проволок потоком выпускных газов; влияние областей с различными режимами обтекания измерительных проволок разного диаметра на обработку экспериментальных данных; использование показаний многопроволочного термометра сопротивления для определения других параметров газового потока; влияние состава газа на показания многопроволочных термометров сопротивления; определение погрешностей измерения. Кроме того, практически отсутствуют исследования количественной картины протекания температурного импульса выпускных газов в быстроходном двигателе внутреннего сгорания в зависимости от режима его работы, а также статистический анализ мгновенной температуры выпускных газов.

Определение мгновенной температуры выпускных газов с  
помощью термометров сопротивления

При измерении температуры  $T$  газа единичным термометром сопротивления уравнение теплообмена с учетом влияния торможения потока проволокой имеет вид

$$T = T_{np} - \zeta \frac{Aw^2}{2gc_p} + \frac{c_p D}{4\alpha} \frac{dT_{np}}{dt}, \quad (1)$$

где  $T$  - температура газа;  $T_{np}$  - температура проволоки;  $W$  - скорость газового потока;  $A$  - тепловой эквивалент механической работы;  $\alpha$  - коэффициент теплоотдачи от газа к проволочке;  $c_p$  - удельная теплоемкость газа при постоянном давлении;  $\zeta$  - коэффициент восстановления;  $D$ ,  $c$  и  $\rho$  - соответственно диаметр, удельная теплоемкость материала и плотность материала проволоки;  $T$  - время.

В формуле (1) не учтено влияние лучистого теплообмена, так как оно ничтожно мало. По литературным данным погрешность от пренебрежения влиянием излучения проволокой составляет не более 0,8% для проволоки диаметром 0,05-0,03 мм и не более 0,4% для проволоки диаметром 0,02-0,01 мм.

Из выражения (1) следует, что для определения температуры газа необходимо, кроме закона изменения температуры проволоки по времени, знать скорость газового потока и коэффициент теплоотдачи  $\alpha$ , который является также переменной по времени величиной. Коэффициент  $\alpha$  для случая вынужденной конвекции определяется из соотношения  $Nu = K(Re)^m$ , где  $K$  и  $m$  - постоянные величины;  $Nu$  - критерий Нуссельта;  $Re$  - критерий Рейнольдса. Из этого выражения имеем

$$\alpha = \frac{K\lambda}{D} \left( \frac{wD}{\nu} \right)^m, \quad (2)$$

где  $\lambda$  и  $\nu$  - соответственно коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости газа.

Для  $Re = 10 + 10^3$ ,  $K = 0,52$ ,  $m = 0,47$ ; для  $Re = 10 + 2 \cdot 10^5$ ,  $K = 0,18$ ,  $m = 0,62$ .

После определения параметров газа методом последовательных приближений определяется  $\alpha$  и температура газа. Величина коэффициента восстановления  $\zeta$  для тонкой проволоки при поперечном обдувании потоком воздуха в дозвуковой области может быть принята равной 0,76. В связи с небольшим количеством трехатомных газов и продуктах сгорания этой величиной пользуются и при определении

температуры выпускных газов.

Метод измерения температуры газа термометром сопротивления с одной провололочкой отличается большой трудоемкостью вычислений и низкой точностью, обусловленной в основном тепловой инерцией проволоочки.

Метод двух проволоочек был предложен Пфримом и в дальнейшем получил свое развитие во многих работах отечественных и зарубежных ученых. Идея метода состоит в том, что проволоочки разного диаметра из одинакового материала или одинакового диаметра из разных материалов имеют разную тепловую инерцию. Это дает возможность из уравнений теплового баланса для одной и другой проволоки, например, разного диаметра, но изготовленных из одного и того же материала с учетом выражения (2) получить зависимость для определения температуры газа без знания коэффициента теплоотдачи

$$T = T_{np1} - \tau \frac{Aw^2}{2qC_p} + \frac{T_{np1} - T_{np2}}{\left(\frac{D_2}{D_1}\right)^{2-m} \frac{dT_{np2}}{dT} - \frac{dT_{np1}}{dT}} - 1, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 относятся к проволоочным одного и другого диаметров. В уравнении (3) также не учтено влияние излучения. Величины  $T_{np1}$ ,  $T_{np2}$ ,  $dT_{np1}/dT$ ,  $dT_{np2}/dT$  определяют по результатам измерения температуры первой и второй проволоочками. Одним из основных недостатков этого метода является большая чувствительность уравнения (3) к производной  $dT_{np}/dT$ , что снижает точность результатов измерения и приводит к значительному разбросу величин температур.

Лучшие результаты получаются при использовании датчиков с тремя измерительными проволоочками. Для любой из трех проволоочек справедливо равенство

$$T = T_{np} - \tau \frac{Aw^2}{2qC_p} + D^{2-m} \frac{dT_{np}}{dT} \left[ \left(\frac{v}{W}\right)^m \frac{C_p}{4K\lambda} \right], \quad (4)$$

полученное из выражения (1) после подстановки в него выражения (2) для  $\alpha$ . Обозначим величину

$$\left[ \left(\frac{v}{W}\right)^m \frac{C_p}{4K\lambda} \right] = B.$$

Для трехпроволочного термометра сопротивления, измерительные проволоочки которого выполнены из одного материала, но разных диаметров, в любой произвольный момент времени в уравнении (4)

$T = idem$ ,  $\tau \frac{Aw^2}{2qC_p} = idem$  и  $B = idem$  для всех трех проволоочек. Следовательно, в уравнениях (4), написанных для трех проволоочек, переменными величинами будут  $T_{np}$  и  $D^{2-m} dT_{np}/dT$ .

Построением графической зависимости  $T_{np} = \{ (D^{2-m} \frac{dT_{np}}{dt}) \}$  определяется значение  $(T + \zeta \frac{Aw^2}{2gC_p})$  в точке пересечения прямой с осью  $T_{np}$ .

Чтобы определить температуру газа, из этого значения необходимо вычесть динамическую добавку температуры.

Показания трехпроводного термометра сопротивления позволяют также определять мгновенные значения скорости газа по формуле

$$W = \nu \sqrt{\frac{C_p}{4K\lambda B}}, \quad (5)$$

где величина  $B$  согласно уравнению (4) равна

$$B = \frac{T + \zeta \frac{Aw^2}{2gC_p} - T_{np}}{D^{2-m} \frac{dT_{np}}{dt}},$$

и определяется по результатам экспериментальных исследований, как тангенс угла наклона прямой линии  $T_{np} = \{ (D^{2-m} \frac{dT_{np}}{dt}) \}$  к оси  $D^{2-m} \frac{dT_{np}}{dt}$ . Для определения скорости по экспериментальному параметру  $B$  необходимо знать величины  $\nu$ ,  $C$ ,  $\rho$ ,  $K$ ,  $\eta$ , и  $\lambda$  для каждого момента времени. Для этого необходимо иметь изменение давления и состава газа по времени.

Коэффициент кинематической вязкости  $\nu$  газа определяется по составу исследуемого газа при известном давлении его по формуле Манна для газовых смесей

$$\nu = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{X_i}{\nu_i}},$$

где  $X_i$  — состав газовой смеси (молярные или объемные доли). Кинематическая вязкость компонента  $\nu_i$  определяется по формуле

$$\nu_i = \frac{\mu_i q}{\gamma_i},$$

где  $\mu_i$  — коэффициент динамической вязкости компонента,  $q$  — ускорение силы тяжести,  $\gamma_i$  — удельный вес компонента.

Коэффициент теплопроводности газов  $\lambda$  в выпускной системе двигателя внутреннего сгорания может быть определен по формуле Линдсея и Бромлея по известному составу газа

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1 + \frac{1}{X_i} \sum_{j=1}^n A_{ij} X_j}, \quad (6)$$

где

$$A_{ij} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[ \frac{\mu_i}{\mu_j} \left( \frac{M_j}{M_i} \right)^{3/4} \frac{(1 + \frac{S_i}{T})^{1/2}}{(1 + \frac{S_j}{T})} \right]^2 \right\} \frac{(1 + \frac{S_{ij}}{T})}{(1 + \frac{S_i}{T})},$$

$\lambda_i$  - коэффициент теплопроводности компонента,  $M_i, M_j$  - молекулярный вес компонента,  $S_i, S_j$  - постоянные Сатерленда для компонента,  $T$  - абсолютная температура.  $S_{ij}$  учитывает столкновение молекул различных газов,  $S_{ij} = \sqrt{S_i S_j}$ . Это выражение несправедливо для газа, молекулы которого сильно полярны (водяной пар). Для водяного пара по данным Грюсса и Шмика  $S_{ij} = 0,733 \sqrt{S_i S_j}$ .

Отношение  $\mu_i/\mu_j$  может быть определено по Эйкену

$$\frac{\mu_i}{\mu_j} = \frac{\lambda_i c_{pi} (9 - \frac{5}{k_i})}{\lambda_j c_{pj} (9 - \frac{5}{k_j})},$$

где

$$k = \frac{c_p}{c_v}.$$

Зависимость  $B=f(W)$  для определенного состава газа, при определенном давлении и температуре выражается кривой, асимптотически приближающейся к осям  $B$  и  $W$ . В работе даны номограммы, рассчитанные для воздуха и среднего состава продуктов сгорания жидкого топлива при ( $\alpha = 1,0$ ) при атмосферном давлении для области изменения чисел  $Re = 10 + 10^8$  (материал измерительных проволочек - вольфрам). Для пользования номограммой параметр полученный экспериментальным путем, следует умножать на коэффициент приведения к условиям номограммы.

Для широкого диапазона изменения числа  $Re$  безразмерное уравнение теплообмена при обтекании цилиндра воздухом обобщается в виде степенной функции  $Nu = K(Re)^m$ . При использовании метода трех проволочек необходимо, чтобы условия теплообмена всех трех измерительных проволочек описывались одной степенной функцией, т.е. чтобы  $K$  и  $m$  в безразмерном уравнении Нуссельта для всех проволочек были одинаковыми. Для удовлетворения этого условия необходимо, чтобы выполнялось равенство

$$\frac{T_{np1} - T_{np2}}{T_{np3} - T_{np2}} = \frac{1 - \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^{2-m} \frac{dT_{np1}/dT}{dT_{np2}/dT}}{1 - \left(\frac{D_3}{D_2}\right)^{2-m} \frac{dT_{np3}/dT}{dT_{np2}/dT}}, \quad (7)$$

которое имеет место при определенном значении  $m$ .

При числах  $Re < 10$  безразмерное уравнение Нуссельта выражается степенным двучленом  $Nu = K_1 + K_2(Re)^m$ , что является причиной нелинейности изменения  $T_{np} = f(D^{2-m} dT_{np}/dT)$  в данной области изменения числа  $Re$ .

По этой причине применение трехпроводного термометра сопротивления для определения мгновенной скорости газового потока не может быть рекомендовано в области изменения числа  $Re < 10$ .

При определении температуры выпускных газов методом многопроводного термометра сопротивления при малых числах  $Re (< 10)$  аппроксимация экспериментальных исследований по теплообмену степенным одночленом  $Nu = 0,84 Re^{0,271}$  хорошо согласуется с обобщенной зависимостью для одиночного цилиндра и дает приемлемые результаты обработки экспериментальных данных.

Метод измерения температуры газа тремя проводочками был использован Бенсоном при последовательном погружении проводочек в газ, что явилось основной причиной недостаточной точности полученных результатов. Благодаря неповторяющейся природе температурной кривой этот метод может быть использован только при одновременной записи тремя проводочками.

#### Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента

Экспериментальное исследование температуры выпускных газов проводилось на двухтактном быстроходном двигателе 4Д 13/14 (ЯМЗ-224) с петлевой продувкой при различных числах оборотов коленчатого вала в минуту и нагрузках. Экспериментальная установка была оборудована измерительными приборами и аппаратурой, позволяющими определять все основные параметры работы двигателя: число оборотов коленчатого вала двигателя; температуру воды на входе в двигатель и на выходе из него; температуру масла в поддоне картера; мощность двигателя; расход топлива; расход воздуха. Согласно принятой методике исследования необходимо знать вязкость  $\nu$  и давление  $p$  выпускных газов. Поэтому установка была оборудована устройствами для записи давлений и отбора и анализа проб выпускных газов.

Для записи давления в цилиндре двигателя и в выпускном трубопроводе применялся пневмоэлектрический индикатор МАИ-2 с датчиками мембранного типа. Для исследования состава выпускных газов был применен стробоскопический отбор газа из выпускной трубы в непосредственной близости от выпускного окна через каждые  $10^\circ$  во всем диапазоне периода выпуска.

Устройство для стробоскопического отбора газовых проб состоит из газоотборника и механизма привода. Газоотборочный кла-

8.

пан — быстродействующий, отробоскопического типа, конструкции Берлинского исследовательского института измерительных устройств и приборов (ГДР). Привод клапана — гидравлический от вспомогательного плунжерного топливного насоса, кулачковый вал насоса кинематически связан с валом исследуемого двигателя. Регулировка момента открытия клапана газоотборника на работающем двигателе производилась изменением угла заклинивания насоса по отношению к валу двигателя с помощью дифференциального редуктора конструкции МВТУ. Редуктор позволяет на ходу устанавливать требуемый угол заклинивания между вращающимися валами. Этот механизм может быть также использован в экспериментальных исследованиях в различных областях машиностроения.

Регистрация фаз открытия газоотборочного клапана и ВМТ производилась на шлейфовом осциллографе МПО-2 с помощью индуктивных датчиков.

Переменная температура выпускных газов регистрировалась в тех же сечениях выпускного трубопровода, что и давление. Мгновенная температура измерялась контактным методом трехпроводным термометром сопротивления при одновременной записи тремя проводочками. С этой целью были сконструированы датчики и соответствующая аппаратура в соответствии с разработанной методикой измерения. Испытания нескольких вариантов датчиков показали, что из двух использованных материалов (платина и вольфрам) вольфрам наиболее пригоден для изготовления чувствительных элементов термометров сопротивления; наилучшим методом крепления проводочки к державкам является электроискровая сварка; место сварки покрывать высокотемпературным цементом не следует (защитную от окисления роль играет никелевый припой); проводочки в датчике следует крепить с провисанием.

Измерительные проводочки датчика диаметром 0,01; 0,02; 0,03 мм выполнены из вольфрама. Измерительная база каждой проводочки составляет 6 мм. Чувствительный элемент датчика предохраняется от воздействия выпускных газов защитным колпачком и вводится в поток только на время замеров.

Каждая измерительная проводочка включается по двухпроводной схеме в одно из плеч неуравновешенного моста переменного тока, питаемого через канал тензостанции УТС-ВТ-12 с несущей частотой 35 кГц.

В измерительную блок-схему входит двенадцатиканальная тензостанция УТС-ВТ-12, шестиканальный пульт, представляющий собой

выносные плечи мостов тензостанции, два датчика с тремя измерительными проволочками каждый, шлейфовый осциллограф МПО-2, измерительный мост ЭТАМ-ЗА и приборы для проверки баланса моста. Измерительный мост ЭТАМ-ЗА служит для измерения сопротивлений термометров. В работе используются две тарировочные зависимости. Первая зависимость  $(R_t/R_{20})_d = f(t)$  показывает результаты тарирования датчика в печи; датчик при этом включается так же, как во время работы, т.е. по двухпроводной схеме. Значения сопротивлений измеряются не методом замещения датчика реохордом или магазином сопротивлений, как принято, а непосредственно с помощью измерительного моста ЭТАМ-ЗА. В этом случае условие тарировки полностью соответствует условиям нагрева всех элементов датчика в выпускной трубе. Данная тарировочная кривая служит для определения температуры, соответствующей положению линий отсчета или так называемой "нулевой" линии на осциллограмме.

Вторая тарировочная кривая  $(R_t/R_{20})_{np} = f(t)$  представляет собой стандартную зависимость сопротивления вольфрамовой проволоки от температуры. Так как протекание этой кривой зависит от чистоты вольфрама, то необходимо для каждой партии проволоки проверить ее экспериментально, т.е. протарировать обычным способом (датчик включать по трехпроводной схеме, а при измерении сопротивлений исключить влияние державок). С помощью второй тарировочной кривой производится обработка записанной осциллограммы относительно "нулевой" линии.

Принятая методика записи и расшифровки температурных осциллограмм с помощью двух тарировочных кривых позволяет производить балансировку измерительных мостов при любом значении температуры измерительных проволочек (в отличие от применяющейся методики, при которой балансировка измерительных мостов производится при температуре проволочек, равной температуре окружающей среды), а также исключает ошибку от нагрева державок в случае включения датчика по двухпроводной схеме. Это повышает качество записи и надежность расшифровки температурных осциллограмм.

Примененная аппаратура и методика обработки температурных кривых позволили экспериментально исследовать температуру выпускных газов в двигателе в широком диапазоне изменения скоростных и нагрузочных режимов.

Экспериментальным исследованием, предусмотренным программой, предшествовала отладочная работа: регулировка топливной аппаратуры на равномерность подачи  $\pm 2,5\%$ , определение оптимального

угла опережения впрыска топлива; отладка работы измерительной аппаратуры; проверка методики исследования.

Исследование точности определения температуры, проведенное с помощью теорем ошибок, показало, что температура выпускных газов определяется по разработанной методике с точностью  $\pm 5\%$ .

### Результаты экспериментального исследования

Экспериментальные исследования проводились при работе двигателя по скоростной ( $n_e = 112$  л.с. при  $n = 1800$  об/мин) и по нагрузочной (при  $n = 1100; 1300; 1600; 1800; 2100$  об/мин) характеристикам.

Давление воздуха  $P_k$  в ресивере двигателя изменялось по скоростной характеристике в пределах  $1,16-1,37$  кг/см<sup>2</sup> соответственно при 1100 и 2100 об/мин. Цикловой расход воздуха по скоростной характеристике оставался почти неизменным, что являлось характерным для двухтактных двигателей. В соответствии с изменением циклового расхода воздуха изменяется и коэффициент избытка продувочного воздуха  $\varphi$ , отнесенный к условиям окружающей среды. При изменении чисел оборотов вала двигателя в диапазоне 1100-2100 в минуту коэффициент избытка продувочного воздуха  $\varphi$  меняется в пределах  $1,39-1,43$ . Такое протекание зависимости  $\varphi$  от  $n$  об/мин характерно для двухтактных двигателей с роторно-шестеренчатым нагнетателем.

Давление газа в цилиндре в начале открытия выпускных окон  $P_k$  изменяется в пределах  $3,7-4,7$  кг/см<sup>2</sup> в указанном выше диапазоне чисел оборотов вала двигателя, что, в основном, определяется величиной максимального давления  $P_z$ ; при работе двигателя по скоростной характеристике давление  $P_z$  колеблется в пределах  $75-92$  кг/см<sup>2</sup>. Давление  $P_n$  в цилиндре двигателя в момент открытия выпускных окон изменяется по линейному закону в зависимости от числа оборотов вала двигателя. На всех скоростных режимах значения  $P_n$  превосходят  $P_k$  и меняются в пределах  $2,0-3,2$  кг/см<sup>2</sup>, что является причиной заброса отработавших газов в продувочный ресивер.

Величина давления  $P_n$  в цилиндре в момент закрытия выпускных окон, условно принимаемая за давление начала сжатия, линейно возрастает с увеличением числа оборотов вала двигателя и составляет  $(0,95 + 0,98) P_k$ , что находится в пределах, обычно рекомендуемых в литературе.

Так как в настоящем исследовании не производился отбор проб

газов из цилиндра двигателя, то для оценки коэффициента продувки  $\varphi$  и коэффициента наполнения  $\eta_{vo}$  изменение коэффициента  $\alpha$  избытка воздуха от числа оборотов коленчатого вала двигателя принято таким, каким оно было получено ранее в опытах на данном двигателе в лаборатории двигателей внутреннего сгорания МВТУ. Это допустимо, так как газозоудушный тракт двигателя и показатели его работы не изменялись.

С увеличением числа оборотов сначала происходит увеличение  $\eta_{vo}$  с 0,4 до 0,7, а затем уменьшение. Максимум находится в области  $n = 1600$  об/мин. Следует отметить низкие значения  $\eta_{vo}$  на всех скоростных режимах, что свидетельствует о плохой очистке цилиндров от продуктов сгорания и об утечке свежего заряда в период дополнительного выпуска.

Увеличение средней температуры выпускных газов при росте числа оборотов вала двигателя от 1100 до 2100 в минуту составляет  $55^{\circ}\text{C}$ . Рост температуры  $t_g$  газов в выпускном трубопроводе объясняется тем, что с увеличением числа оборотов вала двигателя повышается частота циклов, увеличивается догорание топлива в процессе расширения и уменьшаются потери тепла в стенки.

В результате анализа диаграмм изменения состава газа и температурного импульса за выпускными окнами двигателя 4Д 13/14 предложен метод оценки коэффициентов избытка воздуха в цилиндре в процессе сжатия  $\alpha_c$  и расширения  $\alpha_r$ . Это дает возможность количественно оценить показатели качества протекания газообмена в цилиндре двигателя по диаграммам изменения состава газа за выпускными органами. Коэффициент продувки  $\varphi$ , оцененный по данной методике, равен 1,85, а коэффициент остаточных газов  $\gamma_c = 0,34$ .

Результаты исследования показывают, что основные показатели работы двигателя и показатели протекания его газообмена изменяются в пределах, характерных для двигателей подобного типа. Температура выпускных газов — один из важнейших параметров для оценки их энергетического состояния. По ее величине можно также судить о качестве протекания не только газообмена, но и рабочего процесса двигателя. Обработка температурных осциллограмм по разработанной методике позволила определить импульс температуры газа на каждом исследуемом режиме работы двигателя.

Для обобщения выводов необходимо обработать большое количество осциллограмм на каждом режиме работы двигателя, так как от цикла к циклу наблюдается неидентичность температурных осциллограмм. Анализ случайных ошибок, проведенный по результатам

настоящих исследований, показал, что при заданной точности  $\pm 5^{\circ}\text{C}$  нужно обработать 12 осциллограмм.

Анализ изменения температурных диаграмм, полученных при работе двигателя по скоростной характеристике, показывает, что с увеличением числа оборотов вала двигателя с 1100 до 2100 в минуту как средняя температура, так и характер протекания температурного импульса меняются незначительно. Максимальная температура импульса изменяется с  $425$  до  $520^{\circ}\text{C}$ , минимальная температура возрастает с  $190$  до  $220^{\circ}\text{C}$ , а увеличение амплитуды в указанных пределах изменения числа оборотов вала двигателя происходит на  $65^{\circ}\text{C}$ . С ростом числа оборотов максимум импульса температуры несколько смещается в ВМТ. Такой характер изменения температуры выпускных газов по скоростной характеристике объясняется увеличением догорания на линии расширения и уменьшением потерь тепла за цикл при увеличении числа оборотов вала двигателя.

Анализ изменения температуры при работе двигателя по нагрузочным характеристикам показывает, что с ростом нагрузки при постоянном числе оборотов средняя температура импульса заметно растет, что определяется количеством впрыснутого топлива. С увеличением нагрузки наблюдается также значительное увеличение максимальной и минимальной температуры импульса. Например, при изменении нагрузки с 25 до 100% при  $n = 1800$  об/мин максимальная температура импульса возрастает с  $240$  до  $500^{\circ}\text{C}$ , минимальная температура повышается со  $125$  до  $210^{\circ}\text{C}$ , а амплитуда температурного импульса возрастает почти втрое. Смещение максимума и минимума температуры газов по углу поворота коленчатого вала двигателя по нагрузочной характеристике не наблюдается. Такое протекание температурного импульса объясняется постоянством скоростного режима двигателя.

Проведенное исследование мгновенной температуры выпускных газов позволяет количественно оценить удельную энергию выпускных газов на различных режимах работы двигателя при расчете газовых турбин комбинированных двигателей.

### В ы в о д ы

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

I. При исследовании температуры выпускных газов в быстроходном двигателе с помощью термометров сопротивления пренебрегать ошибкой, вносимой тепловой инерцией термоприемника, недо-

пустимо (погрешность может достигать 50% от интервала измеряемых температур).

2. Метод учета тепловой инерции с помощью 3-х проволочного термометра сопротивления (это в равной степени относится и к методу двух проволочек) может применяться только при одновременной записи всеми измерительными проволочками вследствие повторяющейся природы температурных кривых (от цикла к циклу).

3. Разработана методика определения мгновенной температуры выпускных газов в быстроходном двигателе трехпроволочным термометром сопротивления при одновременной записи всеми измерительными проволочками.

4. Разработана измерительная блок-схема, создана измерительная аппаратура, позволяющие проводить исследование переменных температур в широком диапазоне их изменения.

5. Разработана методика записи и расшифровки температурных осциллограмм с помощью 2-х тарировочных кривых, повысившая качество записи и надежность расшифровки температурных осциллограмм.

6. Испытания нескольких вариантов температурных датчиков позволили отработать конструкцию механизма погружения датчика в газовый поток; провести испытания двух термометрических материалов (платина и вольфрам), из которых вольфрам оказался наиболее пригодным для термометрирования выпускных газов; выявить наилучший метод крепления тонких проволок в датчике — электроискровой сваркой; усовершенствовать технологию сварки.

7. В процессе создания экспериментальной установки усовершенствована конструкция муфты индикатора МАИ-2 и датчики давления, повысившие надежность их работы; создана электрическая схема усиления импульсов индуктивных и механического отметчиков, а также индуктивные отметчики фаз времени.

8. Создан оригинальной конструкции планетарный редуктор, позволяющий на ходу изменять угол заклинки между вращающимися валами в кинематически неограниченных пределах. Этот механизм может найти распространение в практике экспериментальных исследований.

9. Предложен метод количественной оценки показателей качества протекания газообмена в цилиндре двигателя по диаграммам изменения состава газа за выпускными органами.

10. Анализ результатов обработки температурных осциллограмм показал, что при малых числах  $Re$  ( $Re < 10$ ) обработку осцилло-

грамм следует проводить в соответствии с аппроксимацией обобщенных экспериментальных исследований по Мак-Адамсу  $Nu = 0,32 + 0,43 Re^{0,52}$  степенным одночленом  $Nu = 0,84 Re^{0,271}$ , что хорошо согласуется с обобщенной зависимостью для обтекания одиночного цилиндра.

II. Результаты измерений трехпроводным термометром сопротивления могут быть одновременно использованы для определения мгновенного числа  $Re$  и скорости газового потока. При этом необходимо, чтобы режим обтекания всех измерительных проводочек описывался одной степенной функцией  $Nu = k(Re)^m$  (с общими величинами  $k$  и  $m$ ). Дана зависимость для проверки этого условия. Рекомендуются определение скорости возможно при числах  $Re > 10$ .

12. Точность метода определения скорости по показаниям трехпроводного термометра сопротивления определяется точностью оценки теплофизических свойств измеряемого газа. Оценка точности, произведенная по массовому расходу газа показала, что определение скорости может быть произведено с точностью  $\pm 10\%$ .

13. Исследование точности определения температуры, произведенное с помощью теории ошибок, показало, что температура выпускных газов определяется по разработанной методике с точностью  $\pm 5\%$ .

14. Анализ неидентичности температурных диаграмм от цикла к циклу, проведенный по результатам исследований на двигателе 4Д 13/14, показал, что необходимо производить обработку не менее 12 последовательных циклов осциллограммы, что обеспечивает при заданной вероятности 0,99 усреднение переменной температуры с точностью  $\pm 5\%$ .

15. Дана количественная картина протекания температурного импульса в выпускной системе быстроходного двухтактного двигателя 4Д 13/14 при работе его по нагрузочной и скоростной характеристикам.

16. Анализ результатов экспериментальных исследований параметров протекания газообмена двигателя 4Д 13/14 показал, что они изменяются в пределах, характерных для двигателей подобного типа. Это дает основание распространить результаты исследований импульса температуры выпускных газов двигателя 4Д 13/14 на различных режимах его работы на двигатели подобного типа.

Основное содержание работы и результаты экспериментальных исследований доложены на:

I. Межвузовской конференции, посвященной 50-ти летию Великой Октябрьской Социалистической революции, в МВТУ им.Баумана,

в 1967 г.

2. Ежегодной научно-технической конференции факультета "Энергомашиностроение" МВТУ им.Баумана в 1969 г.

3. Научно-техническом семинаре кафедры "Комбинированные двигатели внутреннего сгорания" МВТУ им.Баумана в 1969 г.

4. Заседании дизельной секции научно-технического Совета СКБД при заводе "Русский Дизель" в г.Ленинграде в 1970 г.

Изложены в отчете по научно-исследовательской работе 82-2/68 "Исследование мгновенной температуры выпускных газов в быстроходном двигателе внутреннего сгорания", МВТУ им.Баумана, 1970г., а также опубликованы в статьях:

1. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Экспериментальное определение мгновенной температуры газов в выпускной системе двигателей внутреннего сгорания, Известия ВУЗов, Машиностроение, № 2, 1967.

2. Павлович Л.М., Бесступенчатое регулирование фаз открытия газоотборочного клапана, Известия ВУЗов, Машиностроение, № 2, 1967.

3. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Определение мгновенной скорости газового потока с помощью многопроволочного термометра сопротивления, Известия ВУЗов, Машиностроение, № 3, 1970.

4. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Результаты экспериментального исследования температуры выпускных газов быстроходного двухтактного двигателя 4Д 13/14, Известия ВУЗов, Машиностроение, № 5, 1970.

5. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Датчик для измерения быстроменяющихся температур газовых потоков, Выпуск МВТУ им.Баумана, "Машины. Приборы. Стенды", 1970.

6. Круглов М.Г., Павлович Л.М., Зубчатый механизм для изменения угла заклинивания вращающихся валов, Выпуск МВТУ им.Баумана, "Машины. Приборы. Стенды", 1970.

