

Белохвостов Г.И.¹, кандидат технических наук, доцент;
Серебрякова Н.Г.¹, кандидат педагогических наук, доцент;
Мириленко А.П.¹, кандидат технических наук, доцент;
Тиунчик А.А.¹, кандидат физико-математических наук, доцент;
Ковальчук С.В.², старший научный сотрудник,
начальник УКЭР-1 - главный конструктор;
Колодников Р.Э.², научный сотрудник, начальник отдела;
Кунаш М.В.³, старший преподаватель;
Драгун А.Г.¹, студент

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный
технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

² ОАО «Минский тракторный завод», г. Минск, Республика Беларусь

³ Учреждение образования «Барановичский государственный университет»,
г. Барановичи, Республика Беларусь

ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ВЫПУСКА ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Аннотация. В статье систематизированы фундаментальные задачи исследования рабочих процессов в системах выпуска поршневых двигателей внутреннего сгорания. Рассмотрены газодинамические, теплофизические, химические, акустические и прочностные процессы в элементах выпускного тракта. Представлены математические модели нестационарных течений, теплообмена, распространения звуковых волн и термомеханической усталости материалов. Предложена схема комплексного мультидисциплинарного моделирования.

Ключевые слова: система выпуска отработавших газов, газодинамика нестационарных потоков, математическое моделирование.

Abstract. The paper systematizes fundamental research problems of working processes in exhaust systems of reciprocating internal combustion engines. Thermophysical, chemical, acoustic and strength processes in exhaust tract elements are considered. Mathematical models of unsteady flows, heat transfer, kinetics of catalytic reactions, sound wave propagation and thermomechanical fatigue are presented. A scheme of complex multidisciplinary modeling is proposed.

Keywords: exhaust system, unsteady flow, catalytic converter, mathematical modeling.

Введение. Система выпуска отработавших газов поршневого двигателя внутреннего сгорания традиционно рассматривается как совокупность элементов, обеспечивающих отвод продуктов сгорания из цилиндров в атмосферу. Однако, как отмечают В.Н. Луканин и Ю.В. Трофименко [1], в современном понимании она представляет собой сложную динамическую систему, в которой одновременно и взаимосвязанно протекает целый

комплекс физико-химических процессов. К числу важнейших из них относятся нестационарное газодинамическое течение с пульсирующим характером, интенсивный конвективный и лучистый теплообмен, химические реакции окисления и восстановления токсичных компонентов в каталитических нейтрализаторах, акустические явления, а также механические напряжения и деформации элементов конструкции, возникающие под действием циклических тепловых нагрузок.

Фундаментальные исследования перечисленных рабочих процессов необходимы для создания физически обоснованных математических моделей, разработки методов прогнозирования интегральных характеристик системы (противодавления на выпуске, температуры отработавших газов, эффективности нейтрализации, уровня шума и назначенного ресурса), а также для обоснования принципов оптимизации конструктивных решений [2]. Как подчеркивает Р.З.Кавтарадзе [2], без глубокого понимания рабочих процессов любые инженерные оптимизации остаются полуэмпирическими и не гарантируют успеха при переходе к новым типам двигателей.

Настоящая работа представляет собой систематизацию фундаментальных проблем, возникающих при исследовании рабочих процессов в выпускных системах, а также обзор существующих и перспективных математических моделей.

Газодинамические процессы в выпускном тракте

Газодинамика отработавших газов в выпускной системе имеет ярко выраженный нестационарный характер. При открытии выпускного клапана из цилиндра в коллектор вырывается сверхзвуковая струя продуктов сгорания, формирующая волну сжатия, которая распространяется по тракту, отражается от препятствий, интерферирует с последующими волнами и создает сложную картину пульсирующего течения. Как показано в монографии Дж.Хейвуда [3], правильный учет этих волновых процессов исключительно важен, поскольку от них зависят не только гидравлические потери, но и эффективность продувки цилиндров, а, следовательно, мощностные и экономические показатели двигателя в целом.

Основной математической моделью, используемой для описания таких течений, является полная система уравнений Навье-Стокса для сжимаемого вязкого теплопроводного газа. В развернутой форме эта система включает уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

уравнение движения

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\frac{\mu}{3} + \lambda \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v}) \quad (2)$$

и уравнение энергии

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + Q_{\text{хим}} \quad (3)$$

Детальный вывод этих уравнений и обсуждение граничных условий можно найти в фундаментальных трудах Л.Д. Ландау и Е.М. Лифшица [4].

Прямое численное решение системы Навье-Стокса для всей выпускной системы с учетом сложной геометрии и турбулентного характера течения связано с огромными вычислительными затратами. Поэтому на практике часто используют упрощенные подходы, например, одномерное моделирование методом характеристик [5]. Критерием, определяющим степень нестационарности течения, служит число Струхала

$$Sh = \frac{f \cdot L}{U} \quad (4)$$

где f – частота пульсаций, L – характерный размер, U – средняя скорость потока. При значениях $Sh > 0,1$ пульсационными эффектами пренебрегать уже нельзя [5].

Особого внимания заслуживает взаимодействие ударных волн и вихревых структур в коллекторе. Экспериментальные исследования с использованием оптических методов визуализации показывают, что схлопывание волн давления в зонах стыковки патрубков от различных цилиндров может приводить к локальным зонам повышенного давления и забросу отработавших газов в соседний цилиндр [6].

Теплофизические процессы и их связь с термомеханикой

Высокая температура отработавших газов (на режиме номинальной мощности она может достигать 900–1000 °С) обуславливает интенсивный теплоперенос от газа к стенкам выпускного тракта. Основной вклад в этот перенос вносит конвективный теплообмен, однако при температурах выше 800 °С становится существенным и лучистый теплообмен, особенно в зонах, непосредственно примыкающих к выпускным клапанам [2].

Локальная плотность теплового потока от газа к стенке определяется законом Ньютона-Рихмана:

$$q = h \cdot (T_g - T_{cm}) \quad (5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи. Последний не является константой; зависит от скорости и турбулентности потока, физических свойств газа, геометрии канала и пульсационного характера течения. Для его определения используются критериальные уравнения вида

$$Nu = C \cdot Re^m \cdot Pr^n \quad (6)$$

Классическое уравнение Диттуса-Бёлтера

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (7)$$

для стационарного турбулентного течения в трубах приведено в учебнике Й.А.Кенгеля и А.Дж.Гаджара [7]. Однако пульсирующий характер потока вносит поправки: при высоких числах Струхала коэффициент теплоотдачи может возрастать на 20–30 % [6].

Циклический нагрев и охлаждение элементов выпускного тракта приводят к возникновению знакопеременных термомеханических напряжений. Как показано в исследованиях [2], через некоторое число циклов (обычно от 10^4 до 10^6) в зонах концентрации напряжений зарождаются усталостные трещины. Прогнозирование этого процесса выполняется на основе критерия Коффина-Мэнсона:

$$\Delta \varepsilon_p = C \cdot (2N_f)^b \quad (8)$$

где $\Delta \varepsilon_p$ – амплитуда пластической деформации, N_f – число циклов до разрушения, C и b – константы материала. Для жаропрочных сталей и чугунов, применяемых в выпускных коллекторах, показатель b обычно лежит в диапазоне от $-0,5$ до $-0,7$ [8].

Химические процессы в каталитических нейтрализаторах будут представлены в другой работе

Акустические процессы и методы снижения шума

Пульсации давления в выпускной системе являются первичным источником шума двигателя. Нормативные требования к шуму транспортных средств установлены соответствующими стандартами. Распространение акустических волн в тракте описывается волновым уравнением

$$\frac{\partial^2 p_{\text{акуст}}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 p_{\text{акуст}}}{\partial t^2} = 0 \quad (9)$$

где c – скорость звука в газе.

Уровень звукового давления определяется как

$$L_p = 20 \lg \frac{p_{\text{акуст}}}{p_0}, \quad (10)$$

где $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па [5].

Снижение шума достигается с помощью глушителей двух основных типов: реактивных (основанных на отражении и интерференции волн) и абсорбционных (основанных на поглощении энергии звука в пористых материалах). Как показано в справочной литературе [5], сложность моделирования состоит в том, что акустические процессы неразрывно связаны с газодинамическими: форма и скорость течения влияют на распространение волн, а акустические колебания могут изменять структуру течения. Наиболее эффективны комбинированные системы, объединяющие оба принципа.

Концепция мультидисциплинарного моделирования

Анализ, проведенный в предыдущих разделах, показывает, что ни одна из перечисленных физических подсистем не может быть рассмотрена изо-

лированно. Как справедливо отмечает Р.Стоун [11], создание адекватной математической модели системы выпуска требует мультидисциплинарного подхода. В работе [12] также подчеркивается, что современные системы выпуска представляют собой сложные объекты, где газодинамические, тепловые, химические и акустические явления тесно переплетены.

Предлагается следующая иерархическая схема комплексного моделирования. На верхнем уровне стоит газодинамическая модель, решающая систему Навье-Стокса и дающая поля скоростей, давления и начальное распределение температур. На следующем уровне к газодинамической модели подключается тепловая модель, уточняющая коэффициенты теплоотдачи и рассчитывающая прогревание стенок. Затем работает химическая модель, которая использует поля температур и концентраций для расчета скоростей каталитических реакций и степени конверсии. Параллельно акустическая модель на основе пульсаций давления определяет генерируемый спектр шума. Наконец, модель прочности по циклическим температурным полям рассчитывает накопленные усталостные повреждения и прогнозирует ресурс. Возможна обратная связь: например, появление трещины меняет граничные условия для газодинамической модели.

Реализация такой комплексной модели требует значительных вычислительных ресурсов. Перспективным направлением является создание «цифрового двойника» выпускной системы – вычислительной среды, которая в реальном времени получает данные от датчиков на работающем двигателе и прогнозирует будущее состояние системы [9].

Заключение. Фундаментальные исследования рабочих процессов в системах выпуска отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания остаются актуальной научной задачей. В ходе работы были систематизированы ключевые физические подпроцессы: нестационарная газодинамика пульсирующих течений, конвективно-лучистый теплообмен, кинетика гетерогенных каталитических реакций, акустические явления и термомеханическая усталость материалов. Для каждого из них приведены базовые математические модели и показаны границы их применимости.

Приоритетными направлениями дальнейших исследований следует считать: развитие методов прямого численного моделирования турбулентных отрывных течений в элементах тракта сложной геометрии; экспериментальное изучение структуры потока с применением оптических методов PIV и лазерной доплеровской анемометрии [6]; уточнение кинетических параметров каталитических реакций для составов топлив, содержащих биокомпоненты [10]; создание инженерных методик оценки термоусталостного ресурса, учитывающих реальную нестационарность тепловых нагрузок [8]; развитие мультидисциплинарных моделей и создание цифровых двойников [9, 12].

Решение перечисленных задач создаст научную основу для проектирования систем выпуска нового поколения, обеспечивающих минимальное противодействие, высокую эффективность нейтрализации вредных веществ, низкий уровень шума и длительный гарантированный ресурс.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственной программы научных исследований 6 «Механика, машиностроение, роботизированные, беспилотные и интеллектуальные системы», подпрограммы 6.1 «Механика, машиностроение, электротранспортные, роботизированные и беспилотные системы» (задание 6.1.10 «Улучшение газодинамических, аэроакустических и экологических характеристик систем выпуска отработавших газов поршневых двигателей внутреннего сгорания»).

Список использованной литературы

1. Луканин, В.Н., Трофименко Ю.В. Снижение экологической нагрузки от автомобильных двигателей. – М.: Высшая школа, 2001. – 384 с.
2. Кавтарадзе, Р.З. Теория поршневых двигателей. Специальные главы (2-е изд., испр. и дополн.). – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 592 с.
3. Heywood J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. – McGraw-Hill, 1988. – 930 p.
4. Ландау, Л.Д., Лифшиц, Е.М. Гидродинамика. – Т. 6. – 4-е изд. – М.: Физматлит, 2001. – 736 с.
5. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – 3-е изд. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
6. Сабуров, З.Н., Карпов С.В., Осташев С.И. Теплообмен и аэродинамика закрученного потока в циклонных устройствах. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1989. – 276 с.
7. Cengel Y.A., Ghajar A.J. Heat and Mass Transfer: A Practical Approach. – 4th ed. – McGraw-Hill, 2011. – 960 p.
8. Schlichting H., Gersten K. Boundary-Layer Theory. – 8th ed. – Springer, 2017. – 800 p.
9. Fricke J., Emmerich F. Exhaust Gas Aftertreatment: Fundamentals and Applications. – Springer, 2018. – 320 p.
10. Денисов, Е.Т. Кинетика гомогенных химических реакций. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1988. – 391 с.
11. Stone R. Introduction to Internal Combustion Engines. – 4th ed. – Palgrave Macmillan, 2017. – 528 p.
12. Булыгин, Ю.И. Моделирование внутрицилиндровых процессов транспортных двигателей с целью повышения их экономичности и экологичности // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Естественные науки. – 2005. – № S12. – С. 52–60.

Summary. This paper systematizes the fundamental gasdynamic, thermal, chemical, acoustic, and strength processes in exhaust systems of piston engines and proposes a multidisciplinary modeling scheme for their prediction.