

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДВС

Канд. техн. наук, доц. Р.Д. ЕНИКЕЕВ

Представлена технология имитационного моделирования работы двигателя, включая внутрицилиндровые процессы, газообмен, механические потери и газодинамический шум. Описана конфигурация спроектированной системы выпуска, позволившая снизить уровень шума выхлопа двигателя при улучшении его эффективных показателей.

The article deals with the technology of engine operation simulation, including intracylinder processes, gas exchange, mechanical losses and gas dynamic noise simulation. This paper describes the configuration of a designed exhaust system, that allowed the engine exhaust noise level to lowered and its power and fuel consumption parameters to be improved.

Математическому моделированию процессов и разработке систем моделирования двигателя всегда уделялось большое внимание [1, 2]. Результаты настоящего исследования демонстрируют возможности численного моделирования ДВС на примере проектирования выпускной системы четырехтактного двигателя по шумовой характеристике выпуска и внешней скоростной характеристике. Целью исследования было определение вычислительным экспериментом конфигурации системы выпуска четырехтактного четырехцилиндрового двигателя и глушителя легкового автомобиля, снижающих уровень шума выхлопа до перспективных требований при улучшении эффективных показателей двигателя, а также экспериментальное подтверждение результатов моделирования.

Моделирование параметров двигателя

Моделирование осуществлялось с помощью системы имитационного моделирования «АЛБЕЯ», разработанной на кафедре ДВС Уфимского государственного авиационного технического университета.

Система «АЛБЕЯ» предназначена для автоматизированного имитационного моделирования процессов, протекающих в комбинированных двигателях внутреннего сгорания. В состав системы входит ядро, предназначенное для манипулирования программными модулями и обеспечивающее интерфейс с пользователем. Базовые модели системы учитывают волновой характер газодинамических процессов и теплообмен [3]. Настройка системы на конкретную предметную область производится регистрацией в ее библиотеке базового типового набора элементарных моделей (шаблонов) различных объектов этой предметной области в виде программных процессов. Из этих элементов пользователь может строить более сложные модели уже с помощью интерактивных средств самой системы. Разработав программные модели отдельных узлов, например, двигателя, пользователь может прямо на экране дисплея скомпоновать из них модель двигателя в целом или какой-либо из его подсистем. Модель включает следующие модули-элементы: «цилиндр», «поршень», «кривошипно-шатунный механизм», «труба», «ресивер», «атмосфера», «потребитель» и модули-связи — «окно», «клапан», «механическая связь». Прикладные газодинамические модули базируются на уравнениях Эйлера для гладких течений. В частности, модуль «труба» рассчитывает неустановившееся течение газа по трубопроводу переменного сечения с трением и теплообменом, модуль «ресивер» рассчитывает состояние газа в замкнутом

объеме с учетом теплообмена, модуль «клапан» рассчитывает течение газа в местных сопротивлениях (скачок сечения, диафрагма, тарельчатый клапан), модуль «окно» — истечение газа из отверстий, модуль «атмосфера» служит для хранения параметров окружающей среды. Учет потерь в местных сопротивлениях может проводиться по известным коэффициентам потерь или по характеристикам, полученным расчетом течения в трехмерной постановке конкретной конфигурации местного сопротивления. Модель процессов в рабочей камере, реализованная в модуле «цилиндр», рассчитывает внутрицилиндровые процессы ДВС, включая сгорание по модели Вибе и теплообмен при переменном объеме, и учитывает изменение показателя адиабаты в зависимости от температуры и диссоциацию газов. Механические модули «кривошипно-шатунный механизм» и «поршень» рассчитывают кинематику и динамику двигателя с учетом сил трения в подшипниках и трущихся парах. Модуль «потребитель» моделирует нагрузку двигателя. Модуль «механическая связь» рассчитывает мощностной баланс между механическими модулями.

Развитая система меню облегчает управление моделирующей системой и обеспечивает удобную навигацию по модели. Процесс моделирования в системе «АЛБЕЯ» возможен в режиме непрерывной имитации или пошагового расчета модели в целом. Перед началом моделирования, а также в произвольный момент расчета пользователь имеет возможность запросить на экран значения любых переменных любой модели и, если необходимо, изменить ее текущее значение и продолжить моделирование. Система «АЛБЕЯ» имеет несколько информационных экранов, переключаемых по командам пользователя. На этих экранах представляется информация (в графической и табличной форме) о значениях произвольных переменных модели. Системы графиков могут быть двух типов: с абсциссой, в качестве которой может выступать любая переменная модели (время, угол поворота вала двигателя); с «пространственной» координатой по оси абсцисс (т.е. вдоль некоторой траектории, выбранной на схеме в окне сборки).

Система предусматривает возможность, в случае необходимости, расширить моделирующую систему, т.е. добавить к уже имеющемуся в ее распоряжении множеству элементарных прикладных моделей новый базовый элемент.

Для того чтобы начать моделирование двигателя, необходимо построить проект задачи. Для этого пользователь должен выполнить следующие основные действия:

разместить на поле сборки те модули, из которых будет составлена структурная схема модели двигателя (например, цилиндр, впускной трубопровод, выпускной трубопровод, глушитель);

соединить связями порты последовательно взаимодействующих модулей (например, для одноцилиндрового четырехтактного двигателя последовательность связей выглядит следующим образом: атмосфера — впускной трубопровод — впускной клапан — цилиндр — выпускной клапан — выпускной трубопровод — камера глушителя — выпускной патрубком глушителя — атмосфера);

задать начальные значения параметров, находящихся в портах модулей и во внутренних портах связей (например, размеры цилиндров, трубопроводов, температуру, давление среды и стенок);

вести переменные, которые пользователь намерен наблюдать во время моделирования (например, давление в цилиндре, скорость газа на выходе из глушителя).

Более чем двадцатилетний опыт эксплуатации системы «АЛБЕЯ» подтвердил достоверность моделирования работы двигателя как на установившихся, так и на неустановившихся режимах работы.

Моделирование газодинамического шума

Акустическая эффективность впускной и выпускной систем двигателя на стадии его проектирования может определяться с помощью различных методов: расчетом снижения шума на определенных частотах на основе предварительно полученных экспериментальных данных [4, 5]; расчетом колебаний давления в элементах выпускной системы при моделировании нестационарного течения газа в одномерной постановке [1, 6, 7], расчетом объемного расхода газа из выпускного патрубка [8]. Нами шум определялся на заданном расстоянии от выпускного патрубка путем расчета нестационарного течения газа в окрестности среза трубопровода численным интегрированием уравнений газовой динамики. Для моделирования процесса течения в окрестности среза трубопровода вводится двумерная сетка (рис. 1).

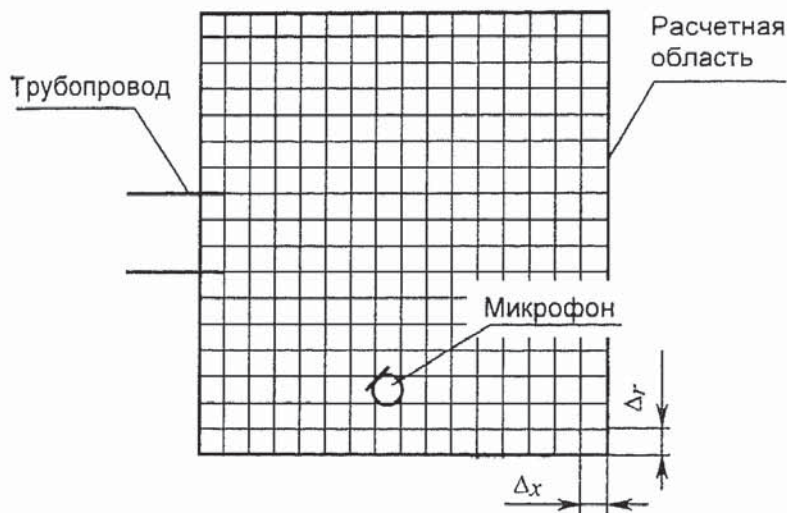


Рис. 1. Расчетная сетка течения газа в окрестности выпускного или впускного трубопровода

Течение рассчитывается по уравнениям сохранения газовой динамики в осесимметричной постановке

$$\begin{cases} \frac{\partial(r\rho)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial(r\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho u^2 + rp)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho uv)}{\partial r} = 0 \\ \frac{\partial(r\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho v^2 + rp)}{\partial r} = p \\ \frac{\partial(r\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(r\rho uE + r\rho p)}{\partial x} + \frac{\partial(r\rho vE + r\rho p)}{\partial r} = 0 \end{cases}$$

где ρ — плотность; p — давление; E — энергия; u и v — составляющие скорости по координатам x и r .

По пространству система дискретизируется для прямоугольных ячеек Δx , Δr с помощью консервативно-монотонной схемы типа Годунова повышенного порядка аппроксимации, в которой решение в ячейке реконструируется с применением кусочно-параболических распределений параметров в ячейке в обоих координатных направлениях.

В процессе расчета определяется зависимость изменения давления от времени в заданной точке пространства (положение микрофона). По кривой изменения избыточного давления проводится расчет уровня звука.

Для постоянного шума, в случае работы двигателя на установившемся режиме, уровень шума рассчитывается по формуле

$$L = 20 \log \left(\sqrt{\sum_1^n \frac{\Delta p_i^2}{n}} / p_0 \right),$$

где $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — значение опорного звукового давления; n — количество значений давления в массиве.

Для неустановившегося шума, что имеет место на переходных режимах работы двигателя, расчет проводится по временному приведению «быстро» с постоянными времени нарастания и спада, равными 125 мс, в соответствии с рекомендацией МЭК. Для расчета уровней звука по частотной характеристике «А» проводится разложение функции изменения звукового давления от времени в ряд Фурье, затем все составляющие спектра суммируются с учетом стандартных поправок.

Результаты моделирования двигателя

Эффективность системы «АЛБЕЯ» и методики расчета уровня звука выпуска демонстрируется расчетом четырехцилиндрового четырехтактного двигателя легкового автомобиля в двух комплектациях выпускной системы с глушителем: серийной и опытной.

Для опытной выпускной системы в качестве базовой принята концепция настроенной системы выпуска с камерным глушителем. В систему входит выпускной коллектор, состоящий из четырех, отдельных для каждого цилиндра патрубков, имеющих одинаковые длины и диаметры. Размеры патрубков определены численным экспериментом по критерию обеспечения минимального количества остаточных газов в цилиндрах при минимальной амплитуде колебаний давления на выходе из ресивера. Также численным экспериментом определен объем ресивера, минимально необходимый для того, чтобы работа одного цилиндра не влияла на работу других, а амплитуда колебаний давления в ресивере была минимальной. Отработавшие газы покидают ресивер через два или несколько трубопроводов разной длины, задача которых — обеспечить равномерное поступление отработавших газов в глушитель при частоте вращения коленчатого вала двигателя, соответствующей условиям испытаний на шумность. Глушитель выпуска представляет собой многокамерный ресивер, камеры которого соединяются между собой патрубками с плавными входами.

Расчеты проведены для двух комплектаций двигателя: с описанной выше опытной системой и с серийной системой выпуска. Расчетные внешние скоростные характеристики приведены на рис. 2.

Расчетное снижение уровня шума выхлопа двигателя с опытной системой выпуска по сравнению с серийной при работе по внешней скоростной характеристике представлено на рис. 3. Как видно из графиков, мощностные и экономические показатели двигателя с опытной системой выпуска лучше на 5—8 %, а шум выхлопа на тестируемых частотах вращения ниже на 8—10 дБА.

Таким образом, принятая концепция двигателя с настроенным выпускным трактом, в сочетании с уменьшением пульсаций давления в ресивере и глушителе решает задачу снижения уровня газодинамического шума двигателя до уровня перспективных требований при улучшении эффективных показателей.

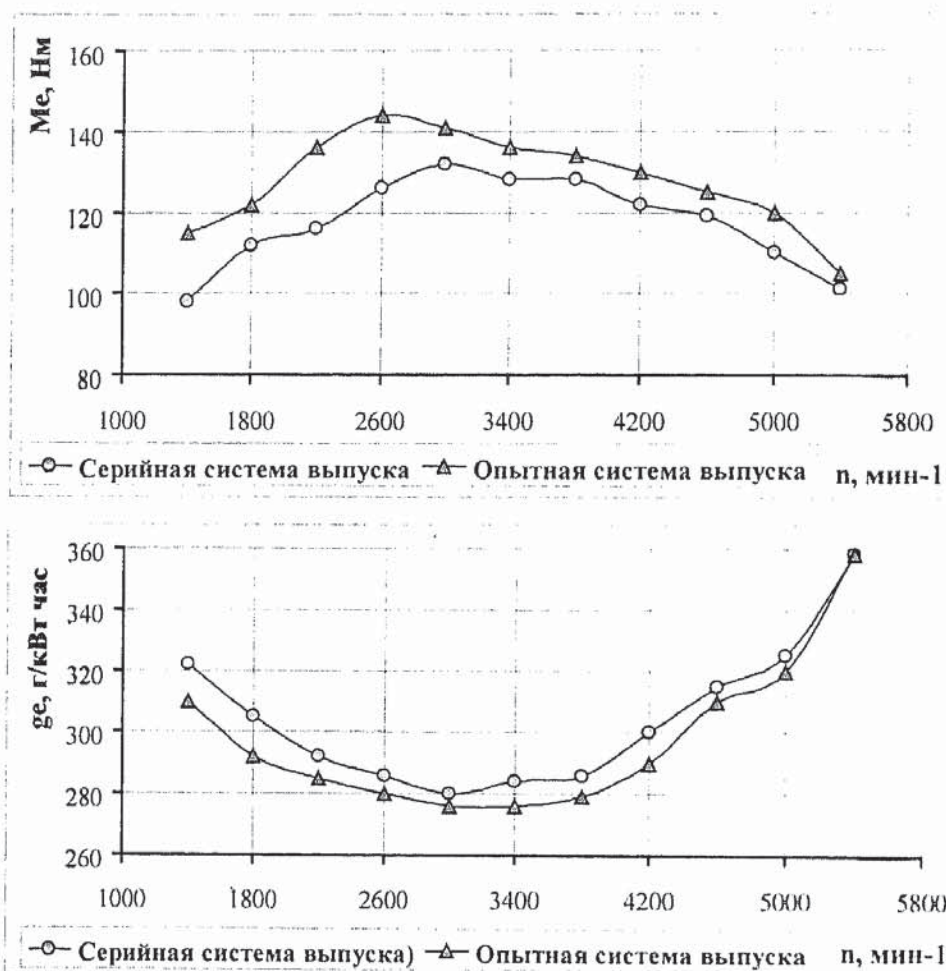


Рис. 2. Расчетные внешние скоростные характеристики

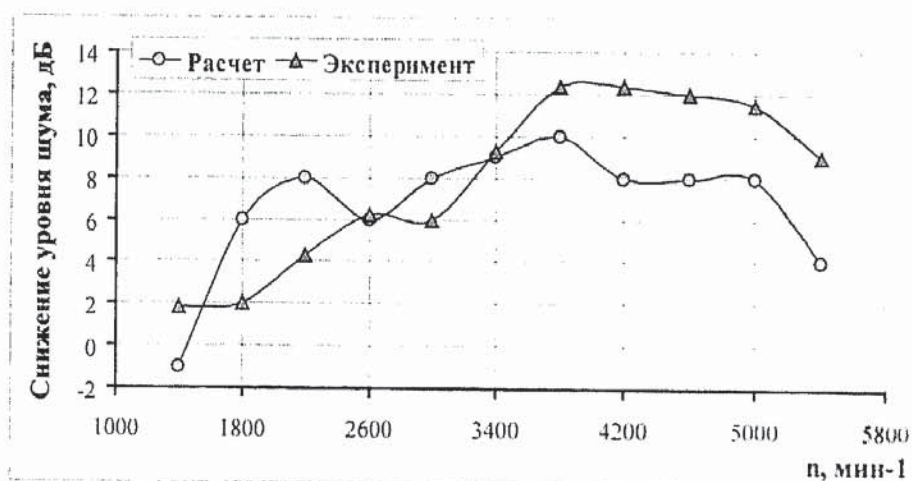


Рис. 3. Снижение уровня шума выхлопа двигателя с опытной системой выпуска в сравнении с серийной системой выпуска

По результатам расчета разработан и изготовлен опытный образец настроенной системы выпуска. На рис. 4, а представлена опытная система выпуска в сборе, на рис. 4, б - настроенные патрубки, размещенные внутри ресивера опытной системы.



Рис. 4. Опытная система выпуска

Результаты испытаний подтвердили расчетные показатели опытной системы: наибольшее расхождение между расчетными и экспериментальными данными по внешней скоростной характеристике составило 10 % (рис. 5), а по уровню газодинамического шума — 5 дБА (рис. 3).

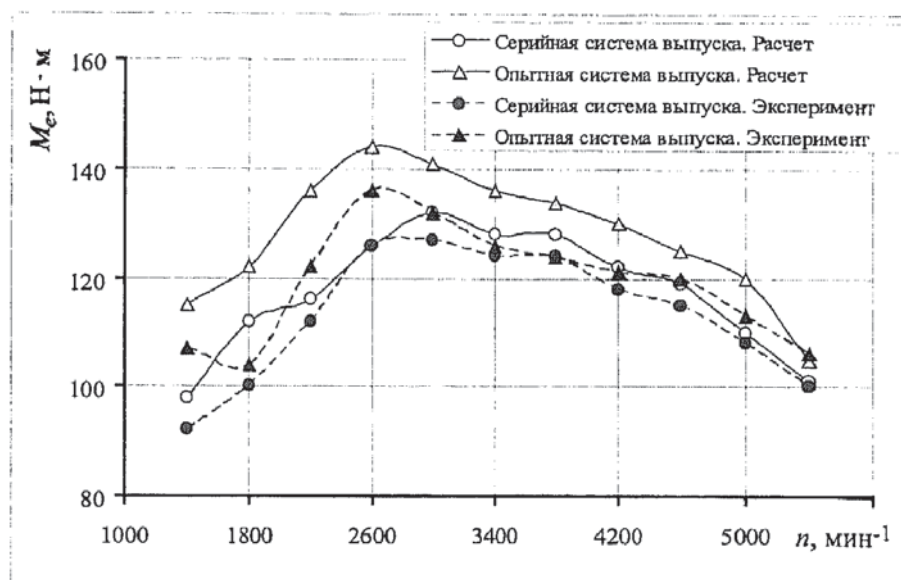


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные внешние скоростные характеристики

Выводы

1. Система имитационного моделирования «АЛБЕЯ» и методика расчета газодинамического шума позволяют с высокой степенью достоверности предсказывать параметры двигателя и уровень газодинамического шума.

2. Разработанная схема выпускной системы двигателя позволяет снизить шум выхлопа на 8 — 10 дБА по сравнению с серийной и одновременно улучшить эффективные показатели двигателя на 5 — 8 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas Morel, John Silvestri, Karl-Alfred Goerg and Rolf Jebasinski. Modeling of Engine Exhaust Acoustics, SAE Paper 1999-01-1665, 1999.
2. Gordon P. Blair, «Design and Simulation of Engines: A Century of Progress», SAE Paper 1999-01-3346, 1999.
3. Рудой Б. П. Прикладная нестационарная гидрогазодинамика: Учебное пособие. — Уфа: Уфимский авиационный институт, 1988, — 184 с.

4. J o n W. P a r s o n s. «Reduction of Exhaust and Air Induction System Noise by a Predictive Method», SAE Paper 931338, 1993.
5. Patricia Hetherington and William Hill, «An Analytical/Empirical Approach to Sound Quality Evaluation for Exhaust Systems», SAE Paper 971872, 1997.
6. C. S. W r e n, O. J o h n s o n. «Gas Dynamics Simulation for the Design of Intake and Exhaust Systems — Latest Techniques», SAE Paper 951367, 1995.
7. K r i s t o f o r R. Norman, James M. Novah and Ahmet Selamet, «Design of an Integral Perforated Manifold, Muffler, and Catalyst», SAE Paper 2001-01-0222, 2001.
8. M. M. Ghafouri, G. Ricci, «A Numerical Method for the Prediction of Exhaust Noise in Internal Combustion Engine Exhaust Systems», SAE Paper 931348, 1993.

621.18—182.2.001.8

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНУТРИКОТЛОВОГО ПРОЦЕССА ПРИ СРАБАТЫВАНИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОГО КЛАПАНА

Д-р техн. наук, проф. Ю.Х. ПОЛАНДОВ, канд. техн. наук, доц. С.А. ВЛАСЕНКО

Исследования показали, что повышение уровня воды в барабане теплотехнической установки приводит к увеличению массы жидкой фазы в составе пароводяной смеси, выбрасываемой через предохранительный клапан при его срабатывании, что ведет к росту опасности от воздействия горячей жидкости и пара.

Researches have shown, that increase of a water level in a steam boiler leads to increase in weight of a liquid phase in the steam-water mixture which is thrown out through a safety valve at its operation that leads to growth of thermal danger from influence of a hot liquid and steam.

Проблема измерения истинного уровня кипящей воды в непрозрачных сосудах достаточно сложна. Это связано с различием уровней жидкости: реального — представляющего собой верхнюю границу между пароводяной смесью и паром, и условного — того, который имел бы место в случае нулевого паросодержания пароводяной смеси*. При этом измерение уровня особенно актуально при исследовании внутрикотловых процессов, происходящих в паровых котлах малого давления (рабочее давление до 0,07 МПа избыточных) при срабатывании предохранительных клапанов, поскольку часть кипящей жидкости из пароводяного пространства в некоторых условиях выбрасывается в окружающую среду через проходное сечение клапана. А это, во-первых, порождает термическую опасность, а во-вторых, приводит к потерям энергии, затрачиваемой на нагрев воды и излишним тратам на ресурсы (вода, топливо и т.д.).

В этой связи была поставлена задача исследования зависимости количества воды, выбрасываемой через предохранительный клапан при его срабатывании, от исходного уровня воды в барабане.

Экспериментальные исследования проводились на паровом котле марки ВКВ 300Л (ОАО «Возовсельмаш») паропроизводительностью 370 кг пара в час и установленном на нем рычажно-грузовом предохранительном клапане марки КПС-0,7 (пропускная способность — 850 кг пара в час).

В ходе экспериментов температура t воды в барабане котла в разных точках по его высоте, давление пара p в барабане котла и под кожухом предохранительного клапана,

*Стырикович М. А., Резников М. И. Методы экспериментального изучения процессов генерации пара. Учеб. пособие для теплоэнергетических специальностей вузов. — М.: Энергия, 1977. — 279 с.