СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.432+532.526.4
EDN: IGEOGP

И.Р. Галиев
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В СУДОВОМ ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС) 6ЧН 12/14. Цель работы – численное исследование характеристик динамического пограничного слоя в области верхней части втулки цилиндра двигателя при изменении угла поворота и частоты вращения коленчатого вала.

Материалы и методы. Математическая модель рабочего процесса двигателя основана на трехмерных уравнениях нестационарного переноса. Для определения характеристик турбулентности использована k-ω SST модель турбулентности.

Основные результаты. Определены закономерности изменения безразмерного параметра y^* и средней скорости воздушного потока в пограничном слое при изменении угла поворота коленчатого вала и частоты вращения с 600 до 2400 мин$^{-1}$. Анализ закона стенки выявил отсутствие в пограничном слое логарифмической области в условиях ДВС.

Заключение. Изучены характеристики динамического пограничного слоя (скорости воздушного потока и закона стенки) в области верхней части втулки цилиндра поршневого ДВС при изменении угла поворота и частоты вращения коленчатого вала. Предложены методические рекомендации по выбору размера конечно-элементной сетки в зависимости от режима работы двигателя. Показано влияние моделей турбулентности k-ω SST, k-ε Standard, k-ε RNG и k-ε Realizable на значения газодинамических (средней и пульсационной скорости воздушного потока) и термодинамических (давления и средней температуры) характеристик в камере сгорания поршневого двигателя.

Ключевые слова: пограничный слой, CFD моделирование, турбулентность, пульсационная скорость, параметр y^+, камера сгорания, k-ω SST модель турбулентности, закон стенки.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SHIP POWERING AND ELECTRIC GENERATION SYSTEMS

UDC 621.432+532.526.4
EDN: IGEOGP

I.R. Galiev
St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

NUMERICAL STUDY OF BOUNDARY LAYER PARAMETERS IN A MARINE PISTON ENGINE

Object and purpose of research. The object of the study was a 6ChN 12/14 piston internal combustion engine. The aim of the study was to numerically investigate the characteristics of the dynamic boundary layer in the upper cylinder liner region with changes in crankshaft rotation angle and speed.

Materials and methods. The mathematical model of the engine's operating process was based on three-dimensional unsteady-state transport equations. A k-ω SST turbulence model was used to determine the turbulence characteristics.

Main results. The patterns of change in the dimensionless parameter y^* and the average airflow velocity in the boundary layer were determined with changes in crankshaft rotation angle and speed from 600 to 2400 min^{-1}. Analysis of the wall law revealed the absence of a logarithmic region in the boundary layer under internal combustion engine conditions.

Для цитирования: Галиев И.Р. Численное исследование параметров пограничного слоя в судовом поршневом двигателе. Труды Крыловского государственного научного центра. 2026; 2(416): 79–88.

For citations: Galiev I.R. Numerical study of boundary layer parameters in a marine piston engine. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2026; 2(416): 79–88 (in Russian).

Conclusion. The characteristics of the dynamic boundary layer (airflow velocity and wall law) in the upper cylinder liner region of a piston internal combustion engine are studied with varying crankshaft rotation angle and speed. Guidelines are proposed for selecting the finite element mesh size depending on the engine operating mode. The influence of the *k*-ω SST, *k*-ε Standard, *k*-ε RNG, and *k*-ε Realizable turbulence models on the values of the gas-dynamic (average and pulsating airflow velocity) and thermodynamic (pressure and average temperature) characteristics in the combustion chamber of a piston engine is demonstrated.

Keywords: boundary layer, CFD modeling, turbulence, pulsating velocity, y^+ parameter, combustion chamber, *k*-ω SST turbulence model, wall law.
The author declares no conflicts of interest.

Введение
Introduction

Процесс создания судового двигателя внутреннего сгорания (ДВС), отвечающего мировым стандартам, включает в себя учет физических и химических явлений, проходящих в т.ч. у стенок цилиндра ДВС.

Известно, что точность численного моделирования процессов теплообмена, погасания пламени, образования несгоревших углеводородов, выгорания масляной пленки в поршневом ДВС зависит от точности моделирования пограничного слоя (ПС) [1]. Поэтому в инженерной и научной практике большое внимание уделяется методам исследования и моделирования процессов в ПС [2].

Большой вклад в изучение динамических и тепловых ПС в цилиндре ДВС внесли ученые из Стенфордского университета [3], которые методом цифровой трассерной визуализации измерили скорость в ПС камеры сгорания (КС) ДВС. Для этого они использовали специальный исследовательский двигатель с оптическим доступом к КС.

Для изучения структуры ПС обычно применяют закон стенки, представляющий собой логарифмическую зависимость безразмерной скорости u^+ (в случае динамического ПС) или температуры T^+ (в случае теплового ПС) от безразмерного расстояния от стенки y^+:

$$y^+ = \frac{U_\tau \cdot \delta}{\nu},$$

где U_τ – динамическая скорость, м/с; δ – расстояние от стенки КС, м; ν – кинематическая вязкость, м^2/с.

Для расчета безразмерной скорости и температуры применяют пристеночные функции. Существует множество вариаций пристеночных функций, выбор которых зависит от большого количества факторов [4]. Кроме этого, экспериментальные и численные исследования, проведенные в Дармштадтском техническом университете [1, 5], показывают, что профиль закона стенки для динамического ПС в условиях поршневого ДВС может значительно отличаться от профилей, полученных на плоской пластине. В частности, зафиксированы сильные отклонения и даже отсутствие логарифмической зоны ПС на поверхности днища поршня. Авторы [5] объясняют это влиянием положительного (неблагоприятного) и отрицательного (благоприятного) градиента давления на ПС. При этом обзор литературы не выявил публикаций, посвященных изучению структуры ПС в верхней части втулки цилиндра – наиболее подверженного высоким температурным градиентам зоны КС. Проведение исследований в данной области позволит повысить точность моделирования теплообмена в КС.

К настоящему времени сформировалось два подхода к численному моделированию ПС в ДВС. В первом случае используется высокорейнольдсовая сетка, при этом область, подверженная влиянию вязкости (т.е. вязкий подслой и буферный слой), не решается. Во втором методе модели турбулентности модифицируются таким образом, чтобы область, подверженная влиянию вязкости, была разрешена с помощью сетки конечных элементов вплоть до стенки, включая вязкий подслой. В данном случае используют низкорейнольдсовую сетку. Это позволяет более детально изучить явления в ПС, а, следовательно, точнее провести численное моделирование тепломассообмена в ДВС [6].

Качество сеточного разрешения определяется безразмерным расстоянием (y^*) от стенки до первого счетного узла, который для получения хорошего результата должен располагаться внутри ламинарного подслоя (т.е. $0 < y^* \leq 5$):

$$y^* = \frac{U_\tau \cdot d_w \cdot 0,5}{\nu},$$

где d_w – размер первой ячейки, м.

При CFD моделировании ДВС построение расчетной сетки с подобным пристеночным разрешением связано с трудностями, которые заключаются в том, что вдоль одной и той же области КС скорость потока меняется на порядки, что означает значительное изменение безразмерного параметра y^* [7]. В таких задачах построение расчетной сетки с условием, что первый пристеночный слой

на всей поверхности цилиндра ДВС будет находиться в ламинарном подслое, приводит к возрастанию количества расчетных ячеек и наличию зон с избыточным количеством ячеек, которые не приводят к уточнению результатов, а лишь создают дополнительную вычислительную нагрузку.

В то же время несоблюдение данного условия приводит к неудовлетворительным результатам, поскольку уже при $y^* > 10$ определение силы трения на стенке КС дает значительную погрешность. Обзор литературы показал отсутствие системного подхода к определению оптимального количества и размера ячеек при численном моделировании ПС в условиях поршневого ДВС. В результате работа по созданию конечно-элементной модели двигателя осуществляется методом подбора оптимального размера сетки, что требует проведения множества тестовых расчетов и создания новых сеток для каждого режима работы двигателя, увеличивая время и трудоемкость CFD моделирования.

Таким образом, влияние вихревых потоков в КС двигателя на структуру ПС является предметом продолжающихся научных исследований. Остается дискуссионным вопрос о выборе модели турбулентности. Исследования в данной области позволят усовершенствовать модели теплообмена в камере сгорания ДВС, повысить полноту сгорания топлива и снизить токсичность выхлопных газов.

Целью настоящей работы: численное исследование характеристик динамического пограничного слоя в области верхней части втулки цилиндра поршневого ДВС при изменении угла поворота и частоты вращения коленчатого вала.

Объект исследования: поршневой двигатель внутреннего сгорания 6ЧН 12/14 (производитель Volvo; степень сжатия 12; диаметр цилиндра 120 мм; ход поршня 140 мм). Выбор марки двигателя обусловлен наличием экспериментальных данных [8] термодинамических (давления и средней температуры) и газодинамических (средней и пульсационной скорости воздушного потока) характеристик, что открывает возможность валидации результатов численного моделирования.

Предмет исследования: характеристики динамического пограничного слоя в камере сгорания ДВС.

Методика исследования

Research methodology

Определение характеристик турбулентности в объеме КС и ПС осуществлялось с использованием CFD моделирования в интервале углов положения коленчатого вала (ПКВ) от 180 до 540 град. Значение φ = 180 град. ПКВ соответствует нижней мертвой точке (НМТ), а φ = 360 град. ПКВ соответствует верхней мертвой точке (ВМТ). Частота вращения коленчатого вала двигателя (КВД) изменялась от 600 до 2400 мин$^{-1}$. Расчет проводился на режиме холодной прокрутки двигателя.

CFD моделирование выполнялось в программе Ansys Fluent, основанной на методе конечных объемов. Методика проведения численного моделирования двигателя соответствовала ГОСТ Р 57700.9-2018 «Численное моделирование физических процессов» и включала следующие этапы:

1) создание CAD модели камеры сгорания, впускного и выпускного каналов двигателя;
2) построение структурированной конечно-элементной сетки;
3) задание граничных условий и выбор модели турбулентности в Ansys Fluent;
4) запуск расчета в Ansys Fluent;
5) анализ сеточной сходимости и (при необходимости) калибровка конечно-элементной сетки;
6) анализ безразмерного параметра y^* и (при необходимости) калибровка конечно-элементной сетки в ПС, т.е. изменение размера первой ячейки, числа слоев и коэффициента роста;
7) анализ устойчивости решений системы дифференциальных уравнений, описывающих термо- и газодинамические процессы в ДВС и (при необходимости) калибровка числа итераций и временного шага решения;
8) анализ результатов CFD моделирования двигателя в Ansys CFD-Post;
9) валидация результатов моделирования путем их сравнения с экспериментальными данными.

Математическая модель рабочего процесса двигателя

Mathematical model of the engine working process

При CFD моделировании применялся итерационный подход, т.е. на каждой итерации решалась система дифференциальных уравнений, описывающих термо- и газодинамические процессы в ДВС. Математическая модель рабочего процесса ДВС была основана на трехмерных уравнениях нестационарного переноса: количества движения (Навье – Стокса), энергии (Фурье – Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности. В общем случае такой подход позволил определить количественные характеристики турбулентности потока

как в глубине КС, так и в ПС. После стандартной процедуры усреднения по Фавру эти уравнения принимают форму Рейнольдса:

$$\bar{\rho}\frac{D\mathbf{W}_i}{D\tau} = \mathbf{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} +$$

$$+\frac{\partial}{\partial x_i}\left[\mu\left(\frac{\partial \mathbf{W}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \mathbf{W}_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial \mathbf{W}_k}{\partial x_k}\right)\right] - \bar{\rho}\mathbf{W}_i'\mathbf{W}_j';$$

$$\bar{\rho}\frac{D\bar{H}}{D\tau} = \mathbf{G}_i\mathbf{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\tau}_{ij}\mathbf{W}_j) +$$

$$+\frac{\partial}{\partial x_i}\left(\Lambda\frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p\bar{\rho}\bar{T}'\mathbf{W}_j'\right) + \mathbf{W}_r\bar{Q}_r + \frac{\partial \mathbf{q}_{Rj}}{\partial x_i};$$

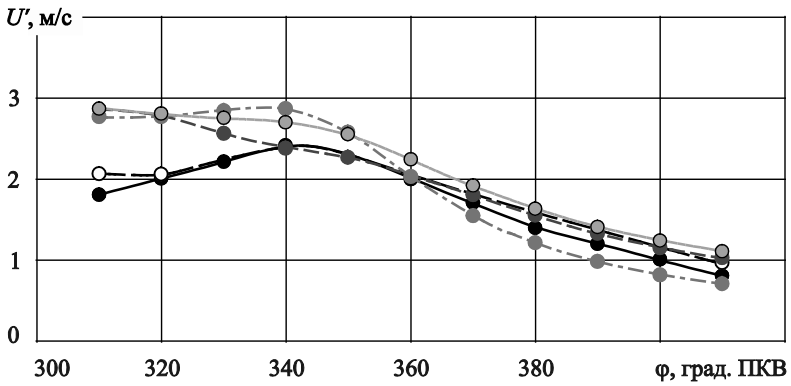
$$\frac{D\bar{C}}{D\tau} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(D_c\frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} - \bar{C}'\mathbf{W}_j'\right) + m;$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{x_j}(\bar{\rho}\mathbf{W}_j) = 0,$$

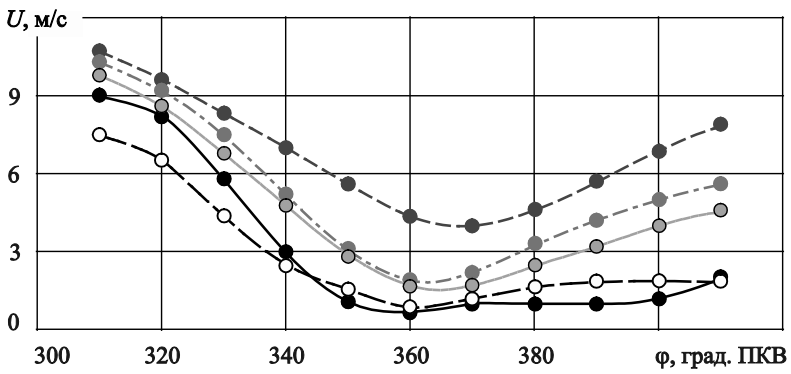
где $\bar{\rho}$ – плотность газа; τ – время; $\mathbf{W}_i$, $\mathbf{W}_j$, $\mathbf{W}_k$ – векторы скорости газа; i, j, k – единичные векторы по осям x, y, z; $\mathbf{G}_i$ – проекция вектора плотности объемных сил; $\bar{p}$ – давление; μ – динамическая вязкость; δ_{ij} – символ Кронекера; $\bar{H}$ – полная удельная энергия; $\bar{T}$ – температура; Λ – теплопроводность; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; $\mathbf{W}_r$ – скорость химической реакции на единицу объема; $\bar{Q}_r$ – количество выделяемой теплоты на единицу массы; $\mathbf{q}_{Rj}$ – плотность теплового потока; D_c – коэффициент диффузии; $\bar{C}$ – концентрация; m – интенсивность источника массы (т.е. скорость изменения массы химической компоненты в единице объема).

Система уравнений Рейнольдса содержит новые неизвестные, для ее замыкания использовалась модель турбулентности k-ω SST (Shear Stress Transport – перенос напряжения сдвига). Данная модель представляет собой комбинацию двух типов моделей турбулентности – стандартной k-ε-модели (служит для моделирования турбулентности в объеме КС) и k-ω-модели Вилкокса (служит для моделирования турбулентности в ПС):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho k W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) + \rho P_k - \rho C_\mu k\omega;$$



а)



б)

Рис. 1. Пульсационная (*а*) и средняя (*б*) скорости потока воздуха в камере сгорания (n = 1200 мин$^{-1}$)

Fig. 1. Pulsation (*a*) and average (*b*) air flow velocity in the combustion chamber (n = 1200 min^{-1})

эксперимент
k-ω SST
k-ε RNG
k-ε Realizable
k-ε Standart

$$\frac{\partial \rho\omega}{\partial \tau}+\frac{\partial \rho\omega W_j}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right)+$$
$$+(1-F_1)2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j}+\alpha_3\frac{\omega}{k}\rho P_k-\rho\beta_3\omega^2,$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость; σ_{k3} и $\sigma_{\omega 3}$ – эмпирические константы; P_k – скорость генерации турбулентной энергии; C_μ – константа, $C_\mu = 0{,}0845$; ω – величина, обратная времени жизни крупных вихрей; F_1 – функция-переключатель; α_3 – обратное число Прандтля; β_3 – эмпирический коэффициент.

Применение k-ω SST модели позволяет сократить количество ячеек в ПС и повысить точность моделирования (в отличие от k-ε или SA моделей). Выбор k-ω SST модели турбулентности был также обусловлен хорошим соответствием численных экспериментов с экспериментальными данными (рис. 1). Проведенный CFD расчет пульсационной и средней скоростей воздушного потока в геометрическом центре КС двигателя (при положении поршня в верхней мертвой точке) с применением k-ω SST модели турбулентности показал лучшее совпадение с экспериментальными данными [8], чем моделей k-ε Standard, k-ε RNG и k-ε Realizable (рис. 1). Кроме этого, сравнение термодинамических характеристик ДВС (давления и температуры), полученных в результате CFD моделирования, со значениями [8] показало сходимость более 97 % для давления и 94 % для температуры. Таким образом, физико-математические и численные подходы, примененные в работе, позволяют с достаточной точностью моделировать процессы в цилиндре ДВС.

Методика выбора параметров конечно-элементной сетки

Methodology for selecting parameters of a finite element mesh

Построение сетки осуществлялось в программе Ansys SpaceClaim Mesh. На рис. 2 представлена структурированная конечно-элементная сетка КС исследуемого двигателя.

Выбор гексаэдрической формы ячеек сетки был обусловлен меньшими (чем у тетраэдрической и призматической форм ячеек сетки) затратами «машинного времени» расчета, меньшим количеством ячеек сетки для получения сеточной сходимости, меньшими затратами оперативной памяти компьютера и лучшим сеточным разрешением в ПС. Для определения оптимального размера ячейки конечно-элементной сетки был проведен анализ сеточной сходимости, который заключался в изучении влияния размера сетки от 0,5 до 4 мм на термо- и газодинамические характеристики двигателя. На рис. 3 представлено относительное отклонение результатов CFD моделирования для ячеек размером 1, 2, 3 и 4 мм от результатов с ячейкой 0,5 мм.

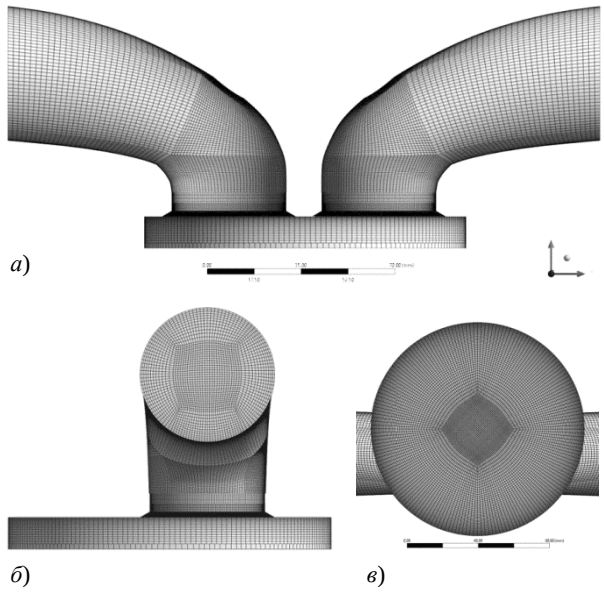


Рис. 2. 3D модель двигателя 6ЧН 12/14 при положении поршня в верхней мертвой точке: вид спереди (*а*), вид сверху (*б*) и вид снизу (*в*)

Fig. 2. 3D model of 6ChN 12/14 engine when the piston is in TDC position: front view (*a*), top view (*b*) and bottom view (*c*)

На рис. 3 видно, что термодинамические характеристики (давление и средняя температура в камере сгорания) практически не изменяются (отклонение менее 4 %) при укрупнении сетки в 8 раз. Поэтому при численном моделировании термодинамических процессов в двигателе допустимо использование грубых сеток с размером ячейки более 4 мм. Также анализ рис. 3 показал, что размер ячеек значительно (до 28 %) влияет на газодинамические характеристики потока. Это объясняется тем, что скорость потока является локальной характеристикой (в отличие от давления) и сильно изменяется в объеме камеры сгорания. Поэтому численное моделирование газодинамических характеристик более требовательно к размеру и форме ячеек сетки. Таким образом, размер ячейки 1 мм является оптимальным с точки зрения точности и продолжительности CFD расчета газодинамических характеристик воздушного заряда в цилиндре двигателя.

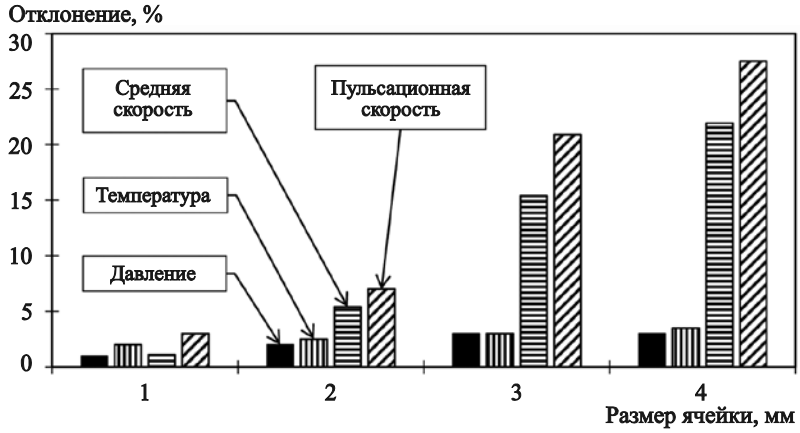


Рис. 3. Зависимость отклонения давления, температуры, средней и пульсационной скоростей от размера ячеек конечно-элементной сетки

Fig. 3. Dependence of the deviation of pressure, temperature, average and pulsation velocity on the size of the finite element mesh cells

Для определения размера конечно-элементной сетки, обеспечивающей точное численное моделирование ПС, было изучено поведение параметра y^* при изменении угла ПКВ, частоты вращения КВД и пульсационной скорости в ПС (рис. 4).

Анализ рис. 4*а* выявил значительные изменения параметра y^* при изменении угла ПКВ. Так, при частоте вращения КВД $n = 2400$ мин$^{-1}$ и движении поршня от НМТ к ВМТ безразмерный параметр y^* увеличивается практически в 7 раз: с 0,25 до 1,85. Анализ результатов зарубежных ученых [9, 10] показал, что выявленная закономерность сохраняется при работе ДВС с иными, чем в данной работе, конструкциями КС и режимами работы ДВС. В совместном исследовании ученых из Стэндфордского и Мичиганского университетов с применением метода цифровой трассерной визуализации показано, что в КС одноцилиндрового ДВС при перемещении поршня от 200 к 320 град. ПКВ безразмерный параметр y^* увеличивается с 2,9 до 16 при $n = 400$ мин$^{-1}$ и с 4,5 до 24 при $n = 800$ мин$^{-1}$ [9].

Анализ работы ученых из университета штата Пенсильвания [10], проводивших CFD моделирование поршневого ДВС с применением LES модели

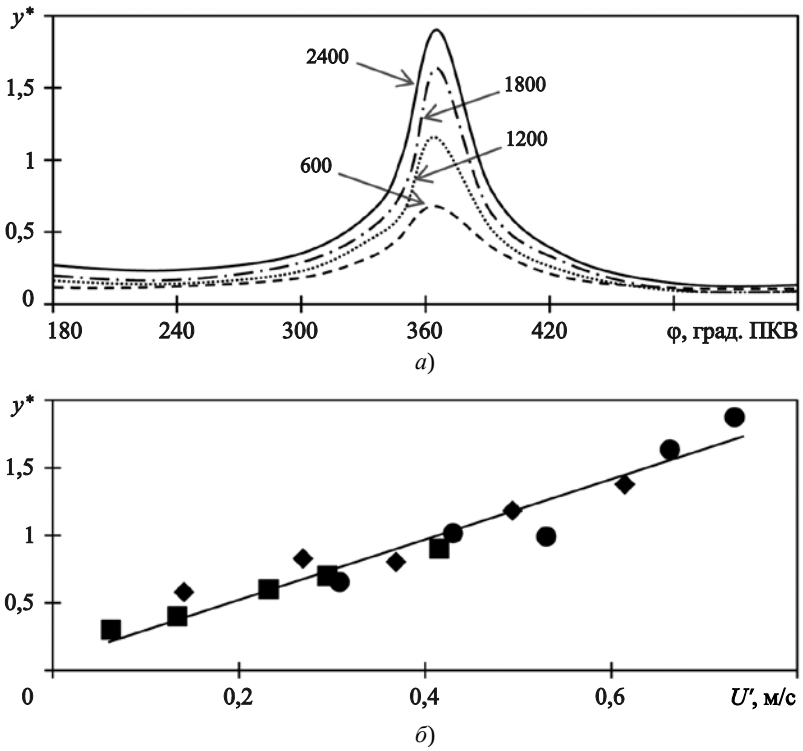


Рис. 4. Зависимость параметра y^* от угла положения коленчатого вала (ПКВ) и частоты вращения коленчатого вала двигателя (*а*) и пульсационной скорости в пограничном слое (*б*):
● – φ = 370 град. ПКВ;
♦ – φ = 380 град. ПКВ;
■ – φ = 390 град. ПКВ

Fig. 4. Dependence of the parameter y^* on angle and rotation frequency (*a*) and pulsation velocity in the boundary layer (*b*):
● – φ = 370 deg.;
♦ – φ = 380 deg.;
■ – φ = 390 deg.

турбулентности, выявил увеличение параметра y^* у стенки цилиндра с 2,8 до 23 (т.е. в 8,2 раза) при перемещении поршня от НМТ к ВМТ. Таким образом, для получения корректных результатов при CFD моделировании ПС во время такта сгорания ДВС (φ от 320 до 400 град. ПКВ) необходимо уменьшать толщину первой ячейки не менее чем в 6 раз по сравнению с НМТ.

Увеличение частоты вращения КВД в 4 раза (с 600 до 2400 мин$^{-1}$) приводит к практически трехкратному увеличению y^* вне зависимости от угла ПКВ (рис. 4*а*). Таким образом, спрогнозировать значение параметра y^* и толщину первой ячейки (d_w) конечно-элементной сетки с погрешностью ±10 % при изменении частоты вращения КВД можно по формулам:

$$y_2^* \sim y_1^* \cdot \frac{n_2}{1,4 \cdot n_1};$$

$$d_{w2} \sim d_{w1} \cdot \frac{1,4 \cdot n_1}{n_2}.$$

Сравнение y^*, рассчитанных по вышеприведенной формуле ($y^*_{расч}$), со значениями y^*, представленными в работе [9] ($y^*_{эксп}$), показало, что с увеличением частоты вращения КВД с 400 до 800 мин$^{-1}$ и φ = 320 град. ПКВ $y^*_{расч}$ = 22,6, а $y^*_{эксп}$ = 24, т.е. погрешность формулы составляет 7,6 %. При φ = 200 град. ПКВ $y^*_{расч}$ = 4,1, а $y^*_{эксп}$ = 4,5, т.е. погрешность формулы составляет 8,8 %.

Связь параметра y^* с пульсационной скоростью U' во внешнем подслое динамического ПС представлена на рис. 4*б*. Выявлено, что при увеличении пульсационной скорости в ПС наблюдается линейный рост параметра y^* вне зависимости от угла ПКВ. Оценить значения параметра y^* и толщину первой ячейки конечно-элементной сетки с погрешностью ±10 % при изменении пульсационной скорости во внешнем подслое динамического ПС можно по формулам:

$$y_2^* \sim y_1^* \cdot \frac{U_2'}{1,1 \cdot U_1'};$$

$$d_{w2} \sim d_{w1} \cdot \frac{1,1 \cdot U_1'}{U_2'}.$$

Сравнение y^*, рассчитанных по вышеприведенной формуле ($y^*_{расч}$), со значениями y^*, представленными в работе [9] ($y^*_{эксп}$), показало, что с увеличением частоты вращения КВД с 400 до 800 мин$^{-1}$ при φ = 320 град. ПКВ скорость в ПС увеличивается с 0,14 до 0,22 м/с, следовательно, $y^*_{расч}$ = 22,9, а $y^*_{эксп}$ = 24, т.е. погрешность формулы составляет 4,8 %.

Для корректного моделирования ПС необходимо выбрать оптимальное количество слоев ячеек конечно-элементной сетки вблизи стенки, которое обеспечивает плавное изменение параметров от вязкого подслоя ($y^+ \approx 1$) до внешней границы ПС. Суммарная толщина указанных слоев должна превышать толщину ПС. Для обеспечения плавного изменения размеров ячеек в ПС также следует задать значение коэффициента роста. При CFD моделировании вихревых потоков в цилиндре ДВС, характеризующихся высокой турбулентностью, рекомендуемое значение данного коэффициента находится в диапазоне 1,1–1,2. Таким образом, выбраны следующие параметры конечно-элементной сетки в ПС ДВС: размер первой ячейки 0,1 мм, количество слоев 50, коэффициент роста 1,15.

Параметры динамического пограничного слоя

Dynamic boundary layer parameters

На рис. 5 представлена графическая зависимость средней скорости воздушного потока у поверхности верхней части втулки цилиндра от угла ПКВ и скоростного режима ДВС.

На рис. 5 видно, что при изменении угла ПКВ все профили скорости демонстрируют схожее по-

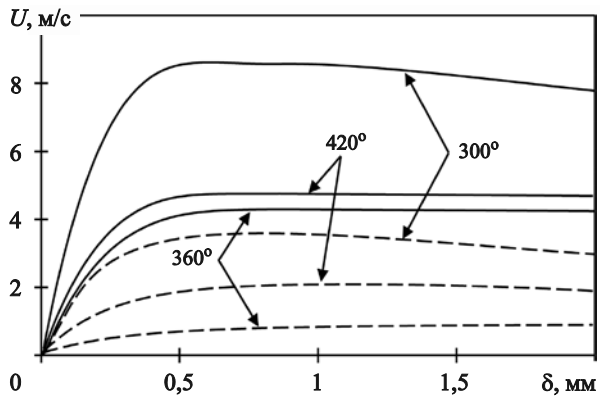


Рис. 5. Зависимость средней скорости воздушного потока у поверхности верхней части втулки цилиндра от угла положения коленчатого вала и частоты вращения коленчатого вала двигателя: --- – n = 1200 мин$^{-1}$; ——— – n = 2400 мин$^{-1}$

Fig. 5. The dependence of the average air flow velocity at the surface of the upper part of the cylinder liner on the crankshaft rotation angle and the engine crankshaft speed: --- – n = 1200 min^{-1}; ——— – n = 2400 min^{-1}

ведение: резкое увеличение значений при отдалении от стенки КС на 0,5 мм с последующим монотонным замедлением скорости после 0,8 мм. Выявлено, что двукратное увеличение частоты вращения КВД приводит к практически двукратному увеличению средней скорости потока в объеме КС и ПС. Анализ работы немецких ученых [5], определивших методом трассерной визуализации скорость вихревого потока у поверхности поршня двигателя, показал наличие выявленной зависимости – пропорциональное увеличение скорости потока в ПС с ростом частоты вращения КВД с 800 до 1500 мин$^{-1}$.

Также обнаружено, что в интервале углов ПКВ, соответствующих процессу сгорания топлива (т.е. от 300 до 420 град. ПКВ), средняя толщина динамического ПС (представляющая собой расстояние от стенки КС до точки, где скорость составляет 99 % от скорости невозмущенного потока) варьируется от 0,5 до 0,8 мм.

На рис. 6 представлена зависимость скорости от расстояния до поверхности КС в переменных закона стенки при изменении частоты вращения КВД и угла ПКВ.

Закон стенки представляет собой зависимость безразмерной скорости u^+ от безразмерного расстояния y^+, построенного в логарифмических координатах:

$$u^+ = \frac{U}{U_\tau}.$$

Выявлено, что двукратное увеличение частоты вращения КВД приводит к заметному увеличению u^+ в области ПС $y^+ > 30$ и практически не оказывает влияние на динамику скорости в вязком подслое $y^+ < 5$.

На рис. 5 также показано сравнение закона стенки в условиях ДВС с законом стенки, построенным для плоской пластины, по формулам:

$$u^+ = \begin{cases} y^+; \text{ если } y^+ < 11, \\ \dfrac{1}{\kappa}\ln(y^+) + B; \text{ если } y^+ \geq 11, \end{cases}$$

где к – постоянная Кармана (к = 0,41); B – логарифмическая постоянная (B = 5,2).

Сравнительный анализ показал, что из-за неравновесных эффектов течения в цилиндре ДВС закон стенки, построенный для плоской пластины, в области логарифмического слоя, сильно отличается от закономерностей, наблюдающихся в ДВС. Можно констатировать, что в условиях ДВС ни один из профилей скорости не указывает на наличие логарифмической области ПС. Одной из возможных причин этого является существенное отличие газодинамических характеристик воздушного потока в экспериментах, проводимых на плоской пластине и ДВС. В частности, в условиях КС двигателя вихревой поток характеризуется высоким уровнем турбулентности, наличием организованной системы впуска, закруткой воздушного вихря и большими градиентами давления. Это существенно контрастирует с экспериментами, проведенными на плоской пластине, равномерно обтекаемой воздушным потоком, со значительно меньшим уровнем турбулентности и отсутствием организованных закруток вихревого потока.

Следовательно, можно ожидать, что использование пристеночных функций, разработанных для плоской пластины, приведет к ошибкам в описании ПС в ДВС. Отметим, что проведенный анализ ре-

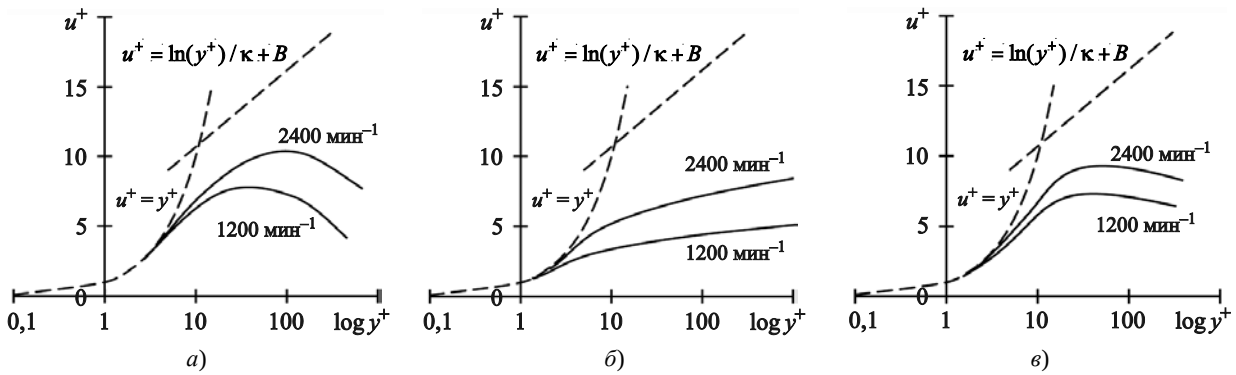


Рис. 6. Зависимость закона стенки от частоты вращения коленчатого вала двигателя и угла положения коленчатого вала: *а*) 300 град.; *б*) 360 град.; *в*) 420 град.

Fig. 6. Dependence of the wall law on the engine crankshaft speed and the crankshaft rotation angle: *a*) 300 deg.; *b*) 360 deg.; *c*) 420 deg.

зультатов ученых из Дармштадтского технического университета [11] и Высшей технической школы Цюриха [12], которые изучали закономерности изменения ПС у поверхности головки поршня ДВС с искровым зажиганием, выявил завышение в несколько раз скорости u^+, рассчитанной для плоской пластины, от реальных значений u^+ в условиях ДВС при $y^+ > 11$. Анализ собственных результатов, а также работ [11, 12] показал, что до $y^+ \leq 5$ (т.е. в области вязкого подслоя) наблюдается хорошее соответствие между законом стенки в условиях ДВС и плоской пластины. Также для этой области не выявлено влияния частоты вращения коленчатого вала ДВС на скорость u^+, что свидетельствует о ламинарном характере течения в вязком подслое.

Заключение

Conclusion

1) В результате проведенного CFD моделирования определены закономерности изменения параметра y^* в ПС при изменении угла ПКВ от 180 до 540 град. и частоты вращения от 600 до 2400 мин$^{-1}$ КВД. Показано, что при движении поршня от нижней (180 град.) до верхней (360 град.) мертвой точки наблюдается увеличение y^* в 6–8 раз. Выявлено, что для получения корректных результатов при CFD моделировании пограничных слоев в ДВС необходимо уменьшать толщину первой ячейки пропорционально увеличению интенсивности турбулентности в КС.
2) Предложены эмпирические зависимости, позволяющие спрогнозировать целевое значение безразмерного параметра y^* и толщину первой ячейки конечно-элементной сетки с погрешностью ±10 % при изменении пульсационной скорости и частоты вращения КВ.
3) Проведенный CFD расчет пульсационной и средней скоростей воздушного потока с применением k-ω SST модели турбулентности показал лучшее совпадение с экспериментальными данными, чем модели k-ε Standard, k-ε RNG и k-ε Realizable.
4) Изучены закономерности изменения параметров ПС в ДВС. Показано, что с ростом частоты вращения коленчатого вала наблюдается пропорциональное увеличение скорости потока в пограничном слое. Анализ закона стенки выявил отсутствие в пограничном слое логарифмической области. Обнаружено, что в интервале углов ПКВ соответствующих процессу сгорания топлива (т.е. от 300 до 420 град. ПКВ) средняя толщина динамического пограничного слоя варьируется от 0,5 до 0,8 мм.
5) Проведенный анализ результатов зарубежных ученых показал, что представленные в статье закономерности справедливы для ДВС с иными, чем в данной работе, режимами работы и конструкциями КС. Результаты работы будут полезны специалистам, занимающимся CFD моделированием газодинамических и тепловых процессов в поршневых ДВС.

Список использованной литературы

1. *Schmidt M.* Experimental investigations of near-wall processes in an optically accessible spark-ignition engine : dissertation / Technical university of Darmstadt. Darmstadt, 2023. XXII, 162 s. DOI: 10.26083/tuprints-00026620.
2. *Галиев И.Р.* Закономерности изменения характеристик турбулентности в пристеночном слое камеры сгорания судового двигателя внутреннего сгорания // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Спец. вып. 1. С. 131–136. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-131-136.
3. An assessment of CFD-based wall heat transfer models in piston engines / *A. Sircar, C. Paul, S. Ferreyro-Fernandez* [et al.] // 10th U. S. National Combustion Meeting. Red Hook : Curran, 2017. Vol. 1. P. 753–758.
4. *Ameen M., Patel S.* Evaluation of wall models for internal combustion engines using direct numerical simulation // Bulletin of the American Physical Society. 2020. Vol. 65, No. 13. 1 p. URL: https://absimage.aps.org/image/DFD20/MWS_DFD20-2020-001092.pdf (Accessed: 17.03.2026).
5. Large eddy simulation of the piston boundary layer evolution during the compression stroke in a motored internal combustion engine / *A. Pati, M. Hasenzahl, S. Jakirlic, C. Hasse* // Flow, turbulence and combustion. 2025. Vol. 114, No. 4. P. 1269–1295. DOI: 10.1007/s10494-025-00649-4.
6. *Jamil A., Baharom M.B., Aziz A.R.* IC engine in-cylinder cold-flow analysis: A critical review // Alexandria engineering journal. 2021. Vol. 60. P. 2921–2945. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.040.
7. Near-wall flame and flow measurements in an optically accessible SI engine / *M. Schmidt, P. Ding, B. Peterson* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2021. Vol. 106. P. 597–611. DOI: 10.1007/s10494-020-00147-9.
8. *Johansson B., Olsson K.* Combustion chambers for natural gas SI engines part I: Fluid flow and combustion // SAE Transactions. 1995. Vol. 104. P. 374–385.
9. Wall heat flux and thermal stratification investigations during the compression stroke of an engine-like geometry:

A comparison between LES and DNS / *C. Mandanis, M. Schmitt, J. Koch* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2018. Vol. 100, No. 3. P. 769–795. DOI: 10.1007/s10494-017-9879-x.

10. Characterizing the evolution of boundary layers in IC engines by combined direct numerical and large-eddy simulations / *G.K. Giannakopoulos, K. Keskinen, J. Koch* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2023. Vol. 110, No. 1. P. 209–238. DOI: 10.1007/s10494-022-00383-1.
11. Development and analysis of wall models for internal combustion engine simulations using high-speed Micro-PIV measurements / *P.C. Ma, T. Ewan, Ch. Jainski* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2016. Vol. 98, No. 1. P. 283–309. DOI: 10.1007/s10494-016-9734-5.
12. Multi-cycle direct numerical simulations of a laboratory scale engine: evolution of boundary layers and wall heat flux / *B.A. Danciu, G.K. Giannakopoulos, M. Bode, C.E. Frouzakis* // Flow, turbulence and combustion. 2025. Vol. 115, No. 1. P. 193–220. DOI: 10.1007/s10494-024-00576-w.

References

1. *Schmidt M.* Experimental investigations of near-wall processes in an optically accessible spark-ignition engine : dissertation / Technical university of Darmstadt. Darmstadt, 2023. XXII, 162 s. DOI: 10.26083/tuprints-00026620.
2. *Galiev I.R.* Variation patterns of turbulence characteristics in wall layer of ship's engine internal combustion chamber // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023. Special Issue 1. P. 131–136. DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-131-136 (*in Russian*).
3. An assessment of CFD-based wall heat transfer models in piston engines / *A. Sircar, C. Paul, S. Ferreyro-Fernandez* [et al.] // 10th U. S. National Combustion Meeting. Red Hook : Curran, 2017. Vol. 1. P. 753–758.
4. *Ameen M., Patel S.* Evaluation of wall models for internal combustion engines using direct numerical simulation // Bulletin of the American Physical Society. 2020. Vol. 65, No. 13. 1 p. URL: https://absimage.aps.org/image/DFD20/MWS_DFD20-2020-001092.pdf (Accessed: 17.03.2026).
5. Large eddy simulation of the piston boundary layer evolution during the compression stroke in a motored internal combustion engine / *A. Pati, M. Hasenzahl, S. Jakirlic, C. Hasse* // Flow, turbulence and combustion. 2025. Vol. 114, No. 4. P. 1269–1295. DOI: 10.1007/s10494-025-00649-4.
6. *Jamil A., Baharom M.B., Aziz A.R.* IC engine in-cylinder cold-flow analysis: A critical review // Alexandria engineering journal. 2021. Vol. 60. P. 2921–2945. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.040.
7. Near-wall flame and flow measurements in an optically accessible SI engine / *M. Schmidt, P. Ding, B. Peterson* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2021. Vol. 106. P. 597–611. DOI: 10.1007/s10494-020-00147-9.
8. *Johansson B., Olsson K.* Combustion chambers for natural gas SI engines part I: Fluid flow and combustion // SAE Transactions. 1995. Vol. 104. P. 374–385.
9. Wall heat flux and thermal stratification investigations during the compression stroke of an engine-like geometry: A comparison between LES and DNS / *C. Mandanis, M. Schmitt, J. Koch* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2018. Vol. 100, No. 3. P. 769–795. DOI: 10.1007/s10494-017-9879-x.
10. Characterizing the evolution of boundary layers in IC engines by combined direct numerical and large-eddy simulations / *G.K. Giannakopoulos, K. Keskinen, J. Koch* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2023. Vol. 110, No. 1. P. 209–238. DOI: 10.1007/s10494-022-00383-1.
11. Development and analysis of wall models for internal combustion engine simulations using high-speed Micro-PIV measurements / *P.C. Ma, T. Ewan, Ch. Jainski* [et al.] // Flow, turbulence and combustion. 2016. Vol. 98, No. 1. P. 283–309. DOI: 10.1007/s10494-016-9734-5.
12. Multi-cycle direct numerical simulations of a laboratory scale engine: evolution of boundary layers and wall heat flux / *B.A. Danciu, G.K. Giannakopoulos, M. Bode, C.E. Frouzakis* // Flow, turbulence and combustion. 2025. Vol. 115, No. 1. P. 193–220. DOI: 10.1007/s10494-024-00576-w.

Сведения об авторе

Галиев Ильдар Ринатович, к.т.н., доцент кафедры судовых двигателей внутреннего сгорания и дизельных установок ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., д. 3. E-mail: sbs777@yandex.ru.

About the author

Ildar R. Galiev, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor, Chair of internal combustion engines and diesel installations, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: sbs777@yandex.ru.

Поступила / Received: 12.03.26
Принята в печать / Accepted: 05.05.26
© Галиев И.Р., 2026