

СЕКЦИЯ 5. Судовая энергетика

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-131-136

УДК 629.5.03-843

EDN: EZJNUG

И.Р. Галиев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», Санкт-Петербург, Россия

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТУРБУЛЕНТНОСТИ В ПРИСТЕНОЧНОМ СЛОЕ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Исследованы закономерности изменения характеристик турбулентности в объеме и пристеночном слое камеры сгорания судового двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Математическая модель рабочего процесса ДВС была основана на трехмерных уравнениях нестационарного переноса: количества движения (Навье – Стокса), энергии (Фурье – Кирхгофа), диффузии (Фика) и неразрывности. Для определения характеристик турбулентности использовалась $k-\omega$ SST модель турбулентности. В результате проведенного CFD-моделирования были определены закономерности изменения кинетической энергии турбулентности (КЭТ) и скорости диссипации в пристеночном слое камеры сгорания судового ДВС с искровым зажиганием при изменении угла положения коленчатого вала от 300 до 420°. Выявлено, что мероприятия, направленные на увеличение интенсивности турбулентности в камере сгорания ДВС, способствуют уменьшению толщины динамического пограничного слоя. Обнаружено, что в пристеночных слоях наблюдается заметное уменьшение кинетической энергии турбулентности и увеличение скорости диссипации, что обусловлено снижением скорости потока, вызванного влиянием поверхности камеры сгорания.

Ключевые слова: пристеночный слой, турбулентность, КЭТ, скорость диссипации энергии, судовой ДВС.

Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

SECTION 5. Ship power engineering

DOI: 10.24937/2542-2324-2023-1-S-I-131-136

UDC 629.5.03-843

EDN: EZJNUG

I.R. Galiev

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

VARIATION PATTERNS OF TURBULENCE CHARACTERISTICS IN WALL LAYER OF SHIP'S ENGINE INTERNAL COMBUSTION CHAMBER

Variation patterns of turbulence characteristics in wall layer of ship's engine internal combustion chamber are investigated. Mathematical model of the ICE working process is based on three-dimensional equations of nonstationary transfer of momentum (Navier – Stokes), energy (Fourier – Kirchhoff), diffusion (Fick) and continuity. Turbulence characteristics were determined using $k-\omega$ SST model of turbulence. CFD modeling indicated regularities in variations of turbulence kinetic energy (TKE) and dissipation rate in ship's ICE chamber with spark ignition in the range of crankshaft angular positions from 300

Для цитирования: Галиев И.Р. Закономерности изменения характеристик турбулентности в пристеночном слое камеры сгорания судового двигателя внутреннего сгорания. Труды Крыловского государственного научного центра. 2023; Специальный выпуск 1: 131–136.

For citations: 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: 131–136 (in Russian).

to 420°. It is found that measures for raising the turbulence strength in the ICE chamber diminish the thickness of dynamic boundary layer. It is discovered that significant reduction of turbulence kinetic energy and increase of dissipation rate are observed, which results from reduction of flow rate affected by the surface of internal combustion chamber.

Keywords: wall layer, turbulence, TKE, energy dissipation rate, ship's ICE.

The author declares no conflicts of interest.

Введение

Introduction

Известно, что именно процессы в пристеночном слое камеры сгорания (КС) судового ДВС играют ключевую роль в образовании несгоревших углеводородов, погасании пламени и теплопередаче. Поэтому исследование характеристик турбулентности в пристеночном слое является актуальной задачей. В данном направлении большую работу проводят ученые из МГТУ им. Баумана, технического университета Эйнховена, Стэнфордского университета и др.

Турбулентность в ДВС можно рассматривать как поток, характеризующийся хаотичными движениями. Турбулентные масштабы длины в ДВС варьируются от размеров системы до значений, при которых вязкость потока предотвращает образование еще меньших масштабов за счет диссипации в тепловую энергию. Крупные масштабы ответственны за большую часть переноса импульса. В процессе сжатия на турбулентность рабочего тела действуют два фактора: плотность газа (снижает уровень турбулентности) и интенсивность вихревого движения, вызванная формой КС (наоборот, способствует усилению турбулентности). С точки зрения теории турбулентности основными параметрами, необходимыми для описания турбулентного потока в ДВС, являются кинетическая энергия турбулентности (КЭТ) k и скорость ее рассеивания ϵ . Скорость диссипации турбулентности связана с масштабами турбулентности, которые являются количественной мерой пространственных характеристик структуры потока. КЭТ связана с интенсивностью турбулентности, которая является мерой скорости турбулентного потока на заданном расстоянии. Увеличение или уменьшение КЭТ всегда тесно связано со скоростью диссипации энергии. Локальные значения КЭТ зависят от интенсивности вихревого движения впускного воздуха, формы КС и характеристик впрыскивания топлива [1]. КЭТ и масштабы турбулентности оказывают существенное влияние на процессы смесеобразования и сгорания [2, 3]. Локальные значения КЭТ играют важную роль в распределении топлива и воздуха в объеме КС; формировании локальных

температур; образовании CO, CH, NO_x и сажи; образовании локальных тепловых нагрузок на детали двигателя [1, 3]. В работе японских ученых [4] обращается внимание, что турбулентные вихри с масштабом Колмогорова могут существенно влиять на конфигурацию фронта пламени и толщину зоны реакции в объеме КС и пристеночном слое. Знание корреляции между турбулентным полем и характеристиками распространения пламени может обеспечить оптимальные с точки зрения экологичности и энергоэффективности режимы горения топлива, а также даст понимание физических явлений в КС, что в конечном итоге способствует улучшению точности моделирования процесса сгорания в судовых поршневых двигателях.

Объект исследования: турбулентное движение воздушного потока в камере сгорания судового ДВС.

Предмет исследования: локальные характеристики турбулентности в пристеночном слое КС.

Цель работы: определение закономерностей изменения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации в пристеночном слое камеры сгорания судового ДВС с искровым зажиганием.

Математическая модель рабочего процесса двигателя

Mathematical model of the engine working process

Определение характеристик турбулентности в объеме КС и пристеночном слое осуществлялось с использованием CFD-моделирования в интервале углов положения коленчатого вала (УПКВ) от 300 до 420° после верхней мертвой точки (ВМТ). Частота вращения коленчатого вала двигателя была постоянной и равнялась 600 мин⁻¹. 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 пограничном слое. После стандартной процедуры усреднения по Фавру эти уравнения принимают форму Рейнольдса (1)–(4):

$$\bar{\rho} \frac{D\bar{W}_i}{Dt} = \bar{G}_i - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \times \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{W}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{W}_j}{\partial x_j} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial \bar{W}_k}{\partial x_k} \right) \right] - \overline{\rho W_i W_j'} \quad (1)$$

$$\bar{\rho} \frac{D\bar{H}}{Dt} = \bar{G}_j \bar{W}_j + \frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} (\tau_{ij} \bar{W}_j) + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - c_p \bar{\rho} \overline{T' W_j'} \right) + \bar{W}_r \bar{Q}_r + \frac{\partial \overline{q R_j'}}{\partial x_i} \quad (2)$$

$$\frac{D\bar{C}}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D_c \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_i} - \overline{C' W_j'} \right) + \bar{m} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\rho} \bar{W}_j) = 0 \quad (4)$$

где W – вектор скорости газа; μ – динамическая вязкость; W_r – скорость химической реакции на единицу объема; Q_r – количество выделяемой теплоты на единицу массы; c_p – теплоемкость при постоянном давлении; δ_{ij} – символ Кронекера; D_c – коэффициент диффузии; C – концентрация; H – полная удельная энергия; ρ – плотность газа; p – давление.

Система уравнений Рейнольдса (1)–(4) содержит новые неизвестные, для ее замыкания использовалась k - ω SST (Shear Stress Transport) модель турбулентности. Данная модель представляет собой комбинацию двух типов моделей турбулентности: стандартной k - ε (служит для моделирования турбулентности в объеме КС) и k - ω модели Уилкокса (служит для моделирования турбулентности вблизи стенок цилиндра):

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{k3}} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \rho P_k - \rho C_{\mu} k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho \omega u_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + (1 - F_1) 2\rho \frac{1}{\sigma_{\omega 2} \omega} \frac{\partial}{\partial x_j} \frac{\partial}{\partial x_j} + a_3 \frac{\omega}{k} \rho P_k - \rho \beta_3 \omega^2 \quad (6)$$

Выбор k - ω SST модели турбулентности был обусловлен результатами численных эксперимен-

тов и их сравнением с экспериментальными данными. CFD-моделирование было выполнено в программе Ansys Fluent 2023 R1, основанной на методе конечных объемов. Построение сетки осуществлялось с учетом обеспечения достаточного пространственного разрешения всех особенностей турбулентного течения. Размер элементов сетки в объеме КС составлял 0,5 мм, а в области впускного клапана – 0,25 мм (рис. 1).

Для численного решения системы уравнений Навье – Стокса использовался метод PISO. Применение k - ω SST модели позволяет существенно сократить количество ячеек в пограничном слое (в отличие от DNS или LES моделей). Однако градиенты осредненных полей скорости и температуры по направлению, перпендикулярному стенке в пограничном слое, остаются все еще высокими и требуют качественного сеточного разрешения в данной области [5]. Качество сеточного разрешения определялось расстоянием от стенки камеры сгорания двигателя до первого счетного узла, который, для получения хорошего результата, располагался внутри ламинарного подслоя, что соответствует значению безразмерного параметра $y^+ < 1$ [6]:

$$y = \frac{d_w u_\tau}{\nu} \quad (7)$$

где d_w – расстояние до стенки камеры сгорания; ν – кинематическая вязкость; u_τ – динамическая скорость, определяемая соотношением:

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (8)$$

Трение на стенке:

$$\tau_w = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial n} \right)_w \quad (9)$$

Для определения адекватности используемой в работе сетки проводилось исследование сеточной чувствительности получаемого решения. Для этого были созданы три последовательно сгущающихся сетки (в зависимости от количества ячеек поперек слоя смешения равные 10, 25 и 50) и получены на них сошедшиеся по итерациям решения. Далее проводилось сравнение решений, полученных на различных сетках. Сравнение с решением, полученным на наиболее подробной сетке, позволило оценить погрешность решения на остальных сетках. В результате в пристеночной области (т.е. на расстоянии 2,5 мм от стенки цилиндра) было использовано 25 ячеек поперек слоя смешения с коэффициентом при-

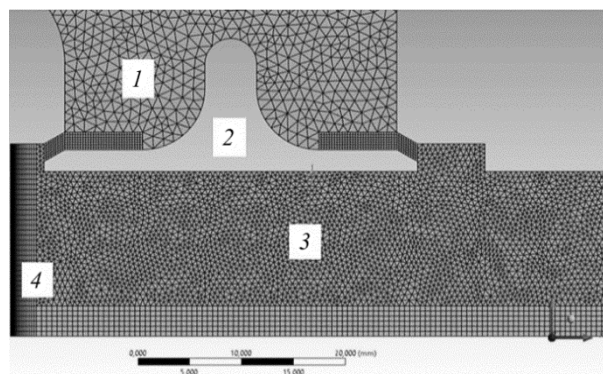


Рис. 1. Сетка конечных элементов в Ansys Fluent: 1 – впускной коллектор; 2 – впускной клапан; 3 – камера сгорания двигателя; 4 – пристеночный слой

Fig. 1. Ansys Fluent FE mesh: 1 – inlet manifold; 2 – inlet valve; 3 – combustion chamber; 4 – wall layer

роста 1,1, что обеспечивало необходимую точность решения ($y^+ < 1$) и вычислительные затраты. На рис. 2 представлена зависимость параметра y^+ от УПКВ. Видно, что при положении поршня в ВМТ y^+ имеет максимальные значения, что обусловлено возросшей скоростью u_τ .

Разработанная математическая модель рабочего процесса судового ДВС была валидирована с использованием экспериментальных индикаторных диаграмм, полученных из собственных данных, на основе проведенных стендовых испытаний моторной установки УИТ-85 [7]. Результаты сравнения показали, что отличие расчетных индикаторных диаграмм давления и температуры от экспериментальных составляет не более 8 и 5 % соответственно. Таким образом, физико-математические и численные подходы, которые используются в работе, являются современными и хорошо зарекомендовали себя для решения задач моделирования турбулентности в ДВС.

Основные результаты и их обсуждение

Main results and discussion

Анализ изменения скорости и температуры в пристеночном слое позволил рассчитать толщину динамического и теплового пограничного слоя, которые равнялись 2 и 1,25 мм соответственно, при положении поршня в ВМТ (т.е. 360°). Отмечено, что увеличение пульсационной скорости в КС, вызванное перемещением поршня, приводит к уменьшению толщины динамического пограничного слоя. Полученный результат находит подтверждение при анализе работы аме-

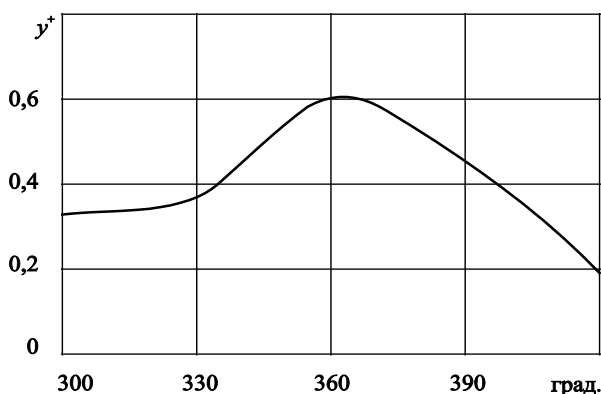


Рис. 2. Зависимость параметра y^+ от углов положения коленчатого вала

Fig. 2. Parameter y^+ versus crankshaft angular positions

риканских ученых из Стэндфордского университета [8], которые экспериментально показали, что увеличение частоты вращения коленчатого вала двигателя с 400 до 800 мин^{-1} приводит к уменьшению динамического пограничного слоя. Таким образом, можно заключить, что мероприятия, направленные на увеличение интенсивности турбулентности в камере сгорания судового ДВС, будут способствовать уменьшению толщины динамического пограничного слоя, что позитивно скажется на экологических характеристиках ДВС в области снижения эмиссии несгоревших углеводородов, концентрация которых сильно зависит от процессов в пограничном слое.

В результате проведенного CFD-моделирования были также получены локальные значения характеристик турбулентности (k и ϵ) при изменении УПКВ (от 300 до 420°) и расстояния до стенки камеры сгорания двигателя $\delta = 2,5; 1; 0,5$ и 0,2 мм (рис. 3).

Обнаружено, что локальные значения КЭТ, характеризующей интенсивность пульсаций, имеют максимальные значения в центральной части КС и геометрически совпадают с центром вихря. В пристеночных слоях КС наблюдается заметное уменьшение КЭТ (особенно при $\delta < 0,5$ мм), что обусловлено снижением скорости потока, вызванного влиянием стенки цилиндра. При этом сохраняется форма кривых зависимости КЭТ от УПКВ (рис. 3а). Выявленная закономерность соблюдалась во всем спектре рассматриваемых углов поворота коленчатого вала ДВС (рис. 3б). Анализ работ зарубежных ученых [8, 9] показал, что данная закономерность наблюдается и в иных, чем в представленной работе, камерах сгорания и режи-

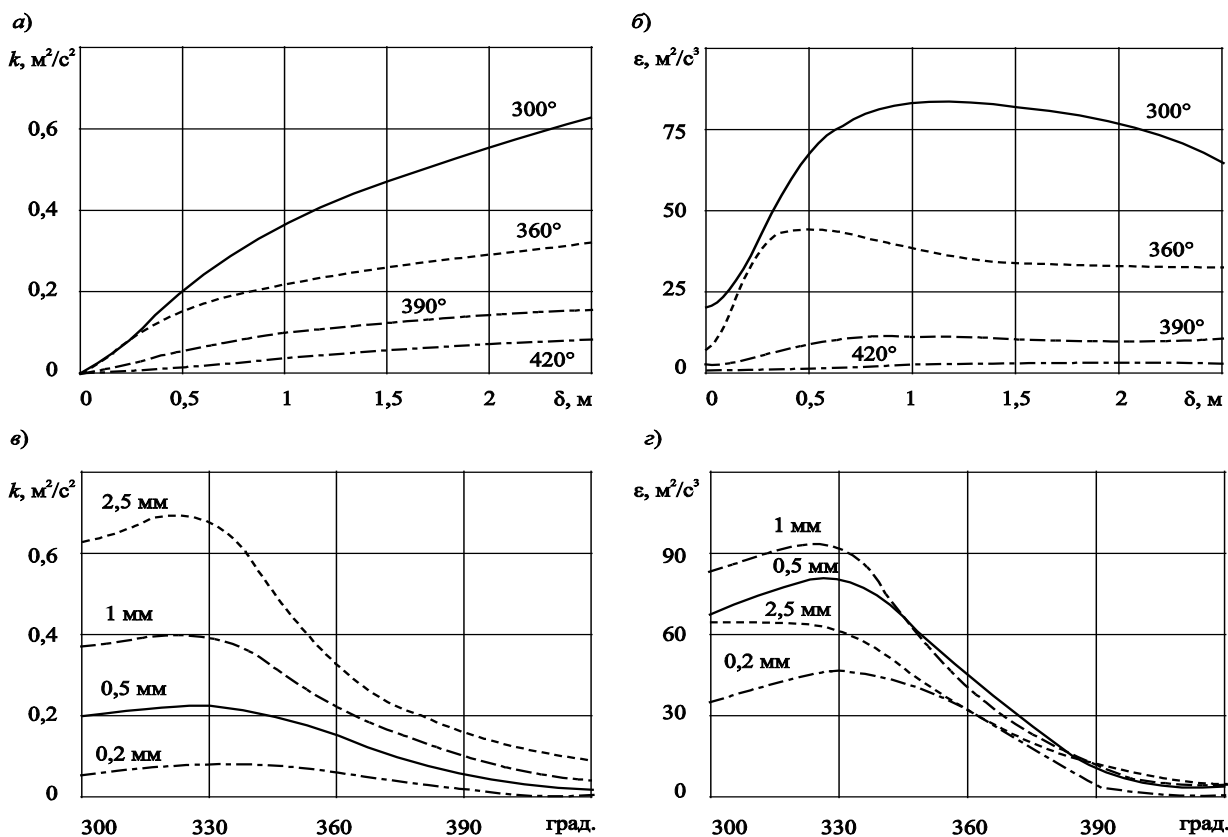


Рис. 3. Изменение значений k и ϵ при приближении к стенке КС (а, б) и при изменении углов положения коленчатого вала (в, г)

Fig. 3. Variations in k and ϵ moving closer to the wall of combustion chamber (а, б) and versus variations in crankshaft angular position (в, г)

маж работы двигателя, что свидетельствует о ее универсальности.

На рис. 3б и 3г представлено изменение скорости диссипации энергии. Исследование поведения скорости диссипации энергии в рассматриваемом диапазоне УПКВ выявило, что ϵ имеет локальный максимум при 300° ($\epsilon = 83 \text{ m}^2/\text{c}^3$), что совпадает с пиком КЭТ (рис. 3б). На рис. 3б показано, что ϵ , представляющая собой убыль КЭТ на единицу времени, увеличивается при приближении к пристеночному слою КС ($\delta = 1 \text{ мм}$), где происходит резкое снижение скорости потока и уменьшение КЭТ. Однако в области вязкого подслоя ($\delta < 0,5 \text{ мм}$) скорость диссипации заметно уменьшается, приближаясь к нулю.

Заключение

Conclusion

Таким образом, выявлено, что мероприятия, направленные на увеличение интенсивности турбулентности

в камере сгорания судового ДВС, будут способствовать уменьшению толщины динамического пограничного слоя. Определены закономерности изменения кинетической энергии турбулентности и скорости диссипации в пристеночном слое камеры сгорания судового ДВС с искровым зажиганием. Обнаружено, что в пристеночных слоях КС наблюдается заметное уменьшение КЭТ и увеличение скорости диссипации, что обусловлено снижением скорости потока, вызванного влиянием стенки цилиндра. Результаты работы позволят повысить точность моделирования рабочего процесса судового ДВС.

Список использованной литературы

1. *Jamil A., Baharom M.B., Aziz A.R.A.* IC engine in-cylinder cold-flow analysis: A critical review // Alexandria Engineering Journal. 2021. Vol. 60, № 3. P. 2921–2945. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.040.

2. *Berni F., Fontanesi S.* A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on in-cylinder simulations // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 174. P. 115320 (24 p.). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115320.
3. Numerical investigation of boundary layer flow and wall heat transfer in a gasoline direct-injection engine / *Fan X., Che Z., Wang T., Lu Z.* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 120. P. 1189–1199. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.089.
4. Simultaneous in-cylinder flow measurement and flame imaging in a realistic operating engine environment using high-speed PIV / *Nishiyama A., Le M.K., Furui T., Ikeda Y.* // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, № 13. P. 2678 (15 p.). DOI: 10.3390/app9132678.
5. Использование пристеночных функций для моделирования турбулентного теплового пограничного слоя / *Ефремов В.Р., Курулин В.В., Козелков А.С.* [и др.] // *Журнал вычислительной математики и математической физики*. 2019. Т. 59, № 6. С. 1037–1046.
6. Моделирование турбулентности. Расчет сдвиговых течений с применением ANSYS FLUENT / *Е.А. Кузнецов* [и др.]. Санкт-Петербург : Политех-пресс, 2020. 49 с.
7. Характеристики распространения пламени и их влияние на образование несгоревших углеводородов и оксида азота в отработавших газах при добавке водорода в топливно-воздушную смесь энергетических установок с искровым зажиганием: монография / *Шайкин А.П., Ивашихин П.В., Галиев И.Р., Дерячев А.Д.* Самара : СамНЦ РАН, 2016. 259 с.
8. Development and analysis of wall models for internal combustion engine simulations using high-speed micro-PIV measurements / *Ma P., Ewan T., Jainski C.* [et al.] // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2017. Vol. 98. P. 283–309. DOI: 10.1007/s10494-016-9734-5.
9. *Barbouchi Z., Bessrou J.* Turbulence study in the internal combustion engine // *Journal of Engineering and Technology Research*. 2009. Vol.1, № 9. P. 194–202.
3. Numerical investigation of boundary layer flow and wall heat transfer in a gasoline direct-injection engine / *Fan X., Che Z., Wang T., Lu Z.* // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. Vol. 120. P. 1189–1199. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.089.
4. Simultaneous in-cylinder flow measurement and flame imaging in a realistic operating engine environment using high-speed PIV / *Nishiyama A., Le M.K., Furui T., Ikeda Y.* // *Applied Sciences*. 2019. Vol. 9, № 13. P. 2678 (15 p.). DOI: 10.3390/app9132678.
5. Application of wall functions for modeling turbulent heat boundary layer/ *Efremov V.R., Kurulin V.V., Kozelkov A.S.* [et al] // *Journal of numerical mathematics and mathematical physics*. 2019. V. 59, No. 6. P. 1037–1046 (*in Russian*).
6. Modeling of turbulence. Calculation of shear flows using ANSYS FLUENT. *E.A. Kuznetsov* [et al]. St. Petersburg : Polytech-press, 2020. 49 p. (*in Russian*).
7. Characteristics of flame spread and their influence on unburnt hydrocarbons and NOx in exhaust gas at hydrogen addition in fuel-air mixture in spark-ignition engines : monograph / *Shaiking A.P., Ivashin P.V., Galiev I.R., Deryachev A.D.* Samara : SamNTs RAN, 2016. 259 p.
8. Development and analysis of wall models for internal combustion engine simulations using high-speed micro-PIV measurements / *Ma P., Ewan T., Jainski C.* [et al.] // *Flow, Turbulence and Combustion*. 2017. Vol. 98. P. 283–309. DOI: 10.1007/s10494-016-9734-5.
9. *Barbouchi Z., Bessrou J.* Turbulence study in the internal combustion engine // *Journal of Engineering and Technology Research*. 2009. Vol.1, № 9. P. 194–202.

References

1. *Jamil A., Baharom M.B., Aziz A.R.A.* IC engine in-cylinder cold-flow analysis: A critical review // *Alexandria Engineering Journal*. 2021. Vol. 60, № 3. P. 2921–2945. DOI: 10.1016/j.aej.2021.01.040.
2. *Berni F., Fontanesi S.* A 3D-CFD methodology to investigate boundary layers and assess the applicability of wall functions in actual industrial problems: A focus on in-cylinder simulations // *Applied Thermal Engineering*. 2020. Vol. 174. P. 115320 (24 p.). DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115320.

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: 05.07.23
Принята в печать / Accepted: 27.07.23
© Галиев И.Р., 2023