УДК 629.5.03-843.8+621.45.022
EDN: PRHLMT

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

ПРИМЕНЕНИЕ ВОДОРОДА В СУДОВЫХ ГАЗОПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования является турбулентное горение бедной метановоздушной смеси в камере сгорания двигателя. Цель работы – изучение закономерностей влияния промотирующей добавки водорода на режим турбулентного горения.

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

Основные результаты. В результате проведенной работы построена диаграмма Борги – Питерса (Borghi – Peters). Показано, что добавление водорода в бедную метановоздушную смесь приводит к смещению расчетных точек из зоны, в которой фронт пламени сильно разорван турбулентными вихрями, к зоне, в которой влияние турбулентности на структуру фронта пламени слабо выражено. Получены численные значения критериев Карловица и Дамкелера, оценивающих влияние промотирующей добавки водорода на режим турбулентного горения в судовом поршневом двигателе внутреннего сгорания.

Заключение. Выявлено, что добавление водорода в бедную метановоздушную смесь в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Дамкелера и уменьшению критерия Карловица. При этом, чем выше концентрация водорода в метановоздушной смеси, тем сильнее проявляется выявленная закономерность. Это свидетельствует об увеличении скорости химических реакций во фронте пламени, в результате чего снижается негативное влияние турбулентных вихрей на фронт пламени и сгорание в двигателе становится более стабильным.

Ключевые слова: судовой газопоршневой двигатель внутреннего сгорания, метановоздушная смесь, водород, критерий Карловица, критерий Дамкелера, диаграмма Борги – Питерса, скорость пламени, бедная смесь.
Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.

UDC 629.5.03-843.8+621.45.022
EDN: PRHLMT

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

THE USE OF HYDROGEN IN MARINE GAS PISTON ENGINES

Object and purpose of research. The object of the study was turbulent combustion of a lean methane-air mixture in the combustion chamber of a marine ICE. The purpose of the work is to study the effect of a hydrogen promoting additive on the turbulent combustion mode.

Materials and methods. The mathematical model of the ICE working process was based on three-dimensional equations of unsteady transfer. The k-ω SST turbulence model was used to determine the turbulence characteristics.

Main results. As a result of the work performed, the Borghi – Peters diagram was constructed. It was shown that the addition of hydrogen to a lean methane-air mixture leads to a shift in the calculated points from the zone in which the flame front is strongly torn by turbulent vortices to the zone in which the effect of turbulence on the structure of the flame front is weakly expressed. Numerical values of the Karlowitz and Damkohler criteria were obtained, evaluating the effect of the hydrogen promoting additive on the turbulent combustion mode in a marine piston internal combustion engine.

Для цитирования: Галиев И.Р. Применение водорода в судовых газопоршневых двигателях. Труды Крыловского государственного научного центра. 2025; 1(411): 101–108.
For citations: Galiev I.R. The use of hydrogen in marine gas piston engines. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2025; 1(411): 101–108 (in Russian).

Conclusion. It is revealed that adding hydrogen to a lean methane-air mixture under intense turbulence conditions leads to an increase in the Damkohler criterion and a decrease in the Karlowitz criterion. Moreover, the higher the hydrogen concentration in the methane-air mixture, the more pronounced the revealed pattern is. This indicates an increase in the rate of chemical reactions in the flame front, because of which the negative effect of turbulent vortices on the flame front is reduced and combustion in the engine becomes more stable.
Keywords: marine gas piston internal combustion engine, methane-air mixture, hydrogen, Karlowitz criterion, Damkohler criterion, Borghi – Peters diagram, flame speed, lean mixture.
The author declares no conflicts of interest.

Введение
Introduction

В свете ужесточающихся экологических и экономических требований к судовым двигателям применение метана (природного газа) в качестве судового топлива приобретает с каждым годом все большую популярность. В 2022 г. в НИИ «Лот» ФГУП «Крыловский государственный научный центр» был разработан стандарт по бункеровке судов, работающих на сжиженном природном газе.

Большую работу по популяризации природного газа в России проводит ПАО «Газпром» [1]. Интерес к строительству и эксплуатации судов на природном газе проявляют судостроительная корпорация «Ак Барс», ПАО «Роснефть», ПАО «Совкомфлот» и другие крупные российские компании. Многие мировые (MTU, MAN, Wartsila и др.) и отечественные (Коломенский завод, РУМО, Волжский дизель и др.) производители судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) имеют в своей линейке газопоршневые двигатели. Поэтому исследования в данной области являются актуальной задачей.

К положительным свойствам природного газа относятся [1–3]:

- высокое октановое число (от 105 до 110);
- низкая (по сравнению с бензином и дизельным топливом) стоимость;
- низкая токсичность отработавших газов;
- повышение ресурса моторного масла (до 30 %);
- снижение эксплуатационных расходов судна (от 20 до 50 %).

Анализ летней навигации первого отечественного речного пассажирского судна «Чайка», использующего природный газ, выявил снижение затрат на обслуживание более чем на 30 % [4]. Судно «Чайка» находилось в рейсах без дозаправки дольше теплоходов на дизельном ходу, т.е. природный газ является более энергетически выгодным видом топлива. Использование природного газа уменьшило выбросы серосодержащих компонентов в атмосферу на 85 %, парниковых газов – на 20 %, а твердые частицы вообще не были зафиксированы [4].

Сжигание гомогенных стехиометрических смесей метана в судовых двигателях с искровым зажиганием является достаточно распространенным решением [5]. Вместе с тем модернизация ДВС, направленная на снижение расхода топлива, требует создания технологии сжигания бедных топливовоздушных смесей. Использование бедной топливовоздушной смеси уменьшает склонность к детонации, поэтому становится возможным работа ДВС с высокими степенями сжатия ($\varepsilon > 12$) [6]. Кроме этого, снижается эмиссия оксидов азота, поскольку бедная смесь приводит к уменьшению теплоты сгорания топлива и, следовательно, температуры пламени.

Однако при коэффициенте избытка воздуха (α) больше единицы происходит уменьшение концентрации топлива и, как следствие, уменьшение скорости распространения пламени, увеличение времени сгорания и цикловой неидентичности рабочего процесса. При работе газопоршневого двигателя на бедных топливовоздушных смесях увеличение скорости и турбулентности потока может обеспечить устойчивую работу двигателя, поскольку крупномасштабные турбулентные потоки, которые формируются в камере сгорания ДВС, в значительной степени влияют на скорость распространения пламени, полноту сгорания топлива и эмиссию вредных веществ. Однако избыточная турбулентность может привести к гашению пламени. Поэтому при профилировании впускных каналов и формы камеры сгорания необходимо глубокое понимание процесса распространения метановоздушного пламени и его взаимодействия с турбулентными вихрями.

Использование водорода в качестве промотирующей добавки к природному газу позволяет значительно улучшить характеристики газопоршневого двигателя [7, 8]. За последние 10 лет многие исследователи изучали влияние добавок водорода в природный газ на экологические и энергетические характеристики ДВС. В англоязычной литературе смесь водорода с природным газом принято называть hythane (производное от слов hydrogen и methane). Данный термин в начале 1990-х гг. предложил глава компании Hydrogen

Components, Inc. (США) Франклин Э. Линч (Franklin E. Lynch). Температура самовоспламенения hythane выше, чем у других видов топлива, следовательно, водород придает топливу антидетонационные свойства [9].

Водород имеет меньшую минимальную энергию зажигания (E = 0,017 МДж), чем природный газ (E = 0,3 МДж), что позволит исключить пропуски зажигания, возникающие при эксплуатации газопоршневых ДВС в зимнее время. Водород характеризуется самой высокой теплотой сгорания среди всех видов топлива (H_u = 120 МДж/кг). Поэтому применение добавок водорода может образовать горючую смесь с метаном при коэффициенте избытка воздуха выше предела воспламеняемости метановоздушной смеси [10].

Сверхбедное сгорание топлива приводит к снижению температуры пламени, снижению теплопередачи в стенки цилиндра, повышению эффективности работы двигателя и снижению выбросов оксидов азота в выхлопных газах [11]. В работе [12] экспериментально исследованы ламинарные скорости горения hythane. Увеличение процентного содержания водорода в метановоздушной смеси приводит к увеличению общей скорости горения и расширению предела воспламеняемости. Т.е. применение водорода улучшит характеристики сжигания обедненной смеси и снизит выбросы судового двигателя.

Аналитическое исследование, проведенное сотрудниками ФГУП «Крыловский государственный научный центр» [13], показало, что для снижения эмиссии парниковых газов судовыми двигателями водород является наиболее перспективным альтернативным топливом. При этом в статье [13] подчеркивается, что применение водорода – это революционное изменение судовой энергетики, которое требует большого объема исследований по обеспечению производства, транспортировки и хранения топлива.

Таким образом, анализ литературы показал перспективность применения водорода для промотирования гомогенных бедных метановоздушных смесей в судовых двигателях. Исследованиями в данной области занимаются ученые ведущих мировых университетов и технологических компаний. Создание эффективной технологии сжигания бедных топливовоздушных смесей требует глубокого понимания механизма распространения пламени и его взаимодействия с характеристиками турбулентности. В настоящее время все еще не исследовано влияние добавок водорода на режим турбулентного горения бедной метановоздушной смеси в условиях поршневого двигателя.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей влияния промотирующей добавки водорода на режим турбулентного горения. Объект исследования – турбулентное горение бедной метановоздушной смеси в камере сгорания ДВС. Предмет исследования – характеристики турбулентного пламени, т.е. критерии Карловица (Ka) и Дамкелера (Da).

Математическая модель рабочего процесса двигателя

Mathematical model of the engine working process

Характеристики турбулентности (k и ε) в цилиндре двигателя вычислялись с использованием k-ω SST (Shear Stress Transport) модели турбулентности в интервале углов положения коленчатого вала от –15° до 50° после верхней мертвой точки.

Модель турбулентности является комбинацией двух типов моделей: стандартной k-ε (используется для моделирования турбулентности в объеме камеры сгорания) и k-ω модели Уилкокса (применяется для моделирования пристеночной турбулентности):

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

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial \tau} + \frac{\partial \rho \omega W_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 3}}\right)\frac{\partial \omega}{\partial x_j}\right) +$$

$$+(1-F_1)2\rho\frac{1}{\sigma_{\omega 2}\omega}\frac{\partial k}{\partial x_j}\frac{\partial \omega}{\partial x_j} + \alpha_3\frac{\omega}{k}\rho P_k - \rho\beta_3\omega^2;$$

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_μ = 0,0845; ω – величина, обратная времени жизни крупных вихрей; F_1 – функция-переключатель; α_3 – обратное число Прандтля; β_3 – эмпирический коэффициент.

Выбор k-ω SST модели турбулентности обусловлен результатами численных экспериментов и их сравнением с экспериментальными данными. Таким образом, физико-математические и численные подходы, которые используются в работе, являются современными и хорошо зарекомендовали себя для решения задач моделирования турбулентности в ДВС.

Пульсационная скорость рассчитывалась с использованием значений кинетической энергии турбулентности (k):

$$U' = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{3}}.$$

Определение масштабов турбулентности выполнялось с применением первой гипотезы Колмогорова по формулам:

$$L_i = \frac{k \cdot U'}{\varepsilon};$$

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4},$$

где L_i – интегральный масштаб турбулентности; η – масштаб Колмогорова; ν – кинематическая вязкость; ε – скорость диссипации энергии.

Нормальная (ламинарная) скорость распространения пламени в условиях ДВС рассчитывалась с применением формулы, предложенной профессором Массачусетского технологического института (США) Джоном Хейвудом (John Heywood) [14]:

$$U_n = U_{n0} \cdot \left(\frac{T_u}{T_0}\right)^{\varphi} \cdot \left(\frac{P_u}{P_0}\right)^{\gamma};$$

$$\varphi = 2{,}18 - 0{,}8 \cdot (\alpha - 1);$$

$$\gamma = -0{,}16 + 0{,}22 \cdot (\alpha - 1),$$

где U_n – нормальная (ламинарная) скорость пламени; U_{n0} – ламинарная скорость пламени при T_0 = 298 К и P_0 = 1 атм; φ и γ – константы; α – коэффициент избытка воздуха; T_u и P_u – температура и давление в ДВС.

Ширина зоны химических реакций ламинарного пламени вычислялась по формуле:

$$\delta_n = \frac{\chi}{U_n},$$

где χ – температуропроводность, м^2/с.

Работа проводилась на исследовательском одноцилиндровом двигателе марки «УИТ-85». Данный тип двигателя обладает низкой цикловой неидентичностью, что позволяет получить высокую точность измерений [7]. Частота вращения коленчатого вала была постоянной и равнялась 900 мин$^{-1}$. Значение угла опережения зажигания было 13° до верхней мертвой точки. Коэффициент избытка воздуха изменялся от 1,2 до 1,4 и рассчитывался по формуле:

$$\alpha = \frac{G_{air}}{G_{cng} \cdot l_{cng} + G_{h2} \cdot l_{h2}},$$

где G_{air} – расход воздуха, кг/ч; G_{cng} – расход природного газа, кг/ч; G_{h2} – расход водорода, кг/ч; l_{cng} – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг природного газа; l_{h2} – теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг водорода.

Изменение коэффициента избытка воздуха осуществлялось увеличением (или уменьшением) расхода топлива, при этом расход воздуха не изменялся и был равен G_{air} = 14 кг/ч. В природный газ добавлялся водород в количестве (g) 5, 10 и 15 %:

$$g = \frac{G_{h2}}{G_{cng} + G_{h2}}.$$

Основные результаты и их обсуждение

Main results and discussion

Влияние добавки водорода на режим горения бедной гомогенной метановоздушной смеси рассматривался с применением диаграммы Борги – Питерса (рис. 1).

Данная диаграмма наглядно показывает влияние физико-химических факторов на процесс горения [15]. Линии на диаграмме разделяют процесс горения на 5 основных зон: ламинарное пламя; искривленный фронт ламинарного пламени; начало разрыва фронта пламени; разорванный фронт пламени; реактор идеального перемешивания.

В зоне *1* интенсивность турбулентности настолько мала, что турбулентное число Рейнольдса $Re_t < 1$, поэтому пламя является ламинарным. Напротив, в зоне *5* турбулентность потока настолько сильна, что зона химических реакций сильно размывается (критерий Дамкелера Da < 1, а критерий Карловица Ka >> 1), данный режим получил название реактора идеального перемешивания. Отметим, что для газопоршневых двигателей режимы 1 и 5 не наблюдаются.

В зоне *2* поверхность фронта пламени деформируется турбулентным потоком. При этом вихри масштаба Колмогорова достаточно велики в сравнении с шириной зоны химических реакций (Ka < 1, Da >> 1), чтобы проникнуть в структуру пламени и влиять на процессы термодиффузии в нем.

Fig. 1. Borghi – Peters diagram: □ – α = 1; Δ – α = 1.2; ○ – α = 1.3; ◇ – α = 1.4; □, Δ, ○, ◇ – *g* = 0 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 5 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 10 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 15 %; *1* – laminar flame zone; *2* – curved laminar flame front zone; *3* – flame front break start zone; *4* – broken flame front zone; *5* – perfectly mixed reactor

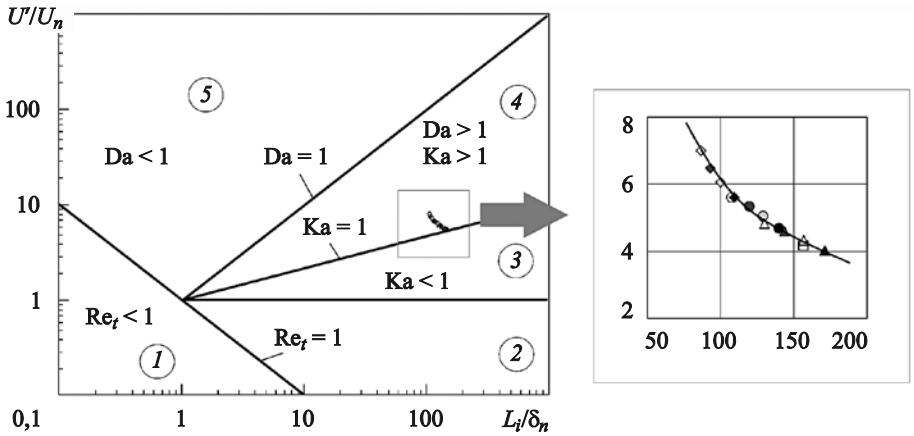


Рис. 1. Диаграмма Борги – Питерса: □ – α = 1; Δ – α = 1,2; ○ – α = 1,3; ◇ – α = 1,4; □, Δ, ○, ◇ – *g* = 0 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 5 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 10 %; ▲, ●, ♦ – *g* = 15 %; *1* – зона ламинарного пламени; *2* – зона искривленного фронта ламинарного пламени; *3* – зона начала разрыва фронта пламени; *4* – зона разорванного фронта пламени; *5* – реактор идеального перемешивания

В зоне *3* усиление интенсивности турбулентности приводит к разрыву фронта пламени, при этом на зону химических реакций и зону подогрева турбулентные вихри не оказывают влияния. На данном режиме площадь поверхности пламени значительно увеличивается, что приводит к увеличению скорости сгорания топлива в двигателе.

На линии раздела зон *3* и *4* вихри масштаба Колмогорова имеют тот же порядок, что и общая толщина пламени, т.е. Ka = 1. Это означает, что в зоне *4* турбулентные вихри начинают влиять на область предварительного нагрева топлива перед фронтом пламени (Ka > 1). В результате поступление несгоревшего топлива в область предварительного нагрева будет увеличиваться, а сама область – расширяться. На диаграмме Борги – Питерса видно, что добавление водорода в бедную метановоздушную смесь приводит к смещению расчетных точек из зоны *4* к зоне *3*, т.е. добавка водорода способствует уменьшению негативного влияния турбулентных вихрей на фронт пламени.

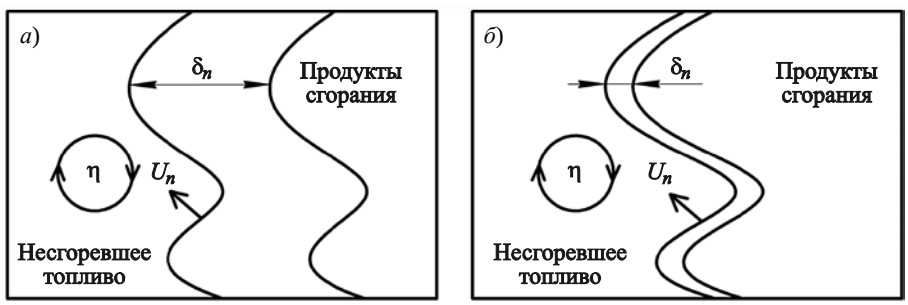
Схематично влияние промотирующей добавки водорода в количестве 15 % на структуру пламени (при α = 1,4) представлено на рис. 2.

Увеличение ширины зоны химических реакций пламени, вызванное обеднением топлива, приводит к тому, что влияние турбулентности на зону химических реакций будет усиливаться и может привести к прекращению горения (рис. 2*а*). Использование водорода способствует уменьшению энергии активации и увеличению температуры пламени, в результате скорость химических реакций будет увеличиваться, а ширина пламени – уменьшаться (рис. 2*б*). Т.е. режим горения становится более стабильным в условиях интенсивной турбулентности, что благотворно отражается на работе двигателя.

Для численной оценки режима горения топлива в ДВС используют критерии Карловица и Дамкелера. Критерий Карловица (Ka) широко применяется в физике горения в качестве оценочного фактора для определения условий прекращения горения за счет растяжения пламени при большой интенсивности турбулентности [16]. Критерий Ka рассчитывают

Рис. 2. Влияние промотирующей добавки водорода на структуру пламени (α = 1,4): *а*) *g* = 0 %; *б*) *g* = 15 %

Fig. 2. Effect of hydrogen addition on flame structure (α = 1.4): *a*) *g* = 0 %; *b*) *g* =15 %



как отношение характерного времени химической реакции к характерному времени течения.

$$\mathrm{Ka} = \frac{T_n}{T_k} = \frac{\delta_n^2}{\eta^2},$$

где T_n – масштаб времени ламинарного пламени; T_k – масштаб времени Колмогорова.

Критерий Дамкелера (Da) представляет собой отношение характерного масштаба времени турбулентности (T_{flow}) к характерному химическому масштабу времени (T_{chem}). Большие значения Da свидетельствуют о значительной разнице между химическим и турбулентным масштабами времени. Это означает, что химические реакции протекают быстрее по сравнению с турбулентным потоком, поэтому турбулентные вихри, искривляя поверхность фронта пламени, не оказывают существенного влияния на структуру зоны химических реакций.

$$\mathrm{Da} = \frac{T_{flow}}{T_{chem}} = \frac{L_i / U'}{\delta_n / U_n},$$

где T_{flow} – масштаб времени турбулентности; T_{chem} – продолжительность химических реакций во фронте пламени.

На рис. 3 представлена зависимость критериев Ka и Da от коэффициента избытка воздуха и массовой доли водорода в метановоздушной смеси.

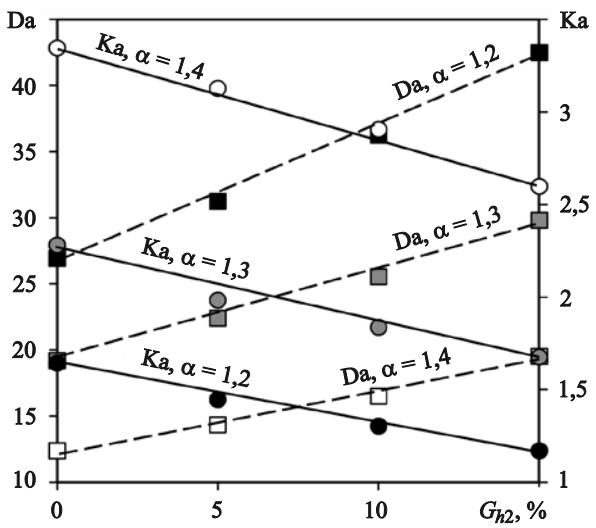


Рис. 3. Зависимость критериев Ka (———) и Da (– – –) от коэффициента избытка воздуха и массовой доли водорода (g) в метановоздушной смеси

Fig. 3. Dependence of the criteria Ka (———) and Da (– – –) on the excess air coefficient and the mass fraction of hydrogen (g) in the methane-air mixture

На рис. 3 видно, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Ka с 1,64 (при α = 1,2 и g = 0 %) до 3,4 (при α = 1,4 и g = 0 %). Добавление водорода способствует уменьшению критерия Карловица, при этом чем больше концентрация водорода в метановоздушной смеси, тем ниже значение Ka.

Обратная зависимость наблюдается при рассмотрении критерия Дамкелера. При добавке водорода g = 15 % Da увеличивается с 12 (при α = 1,4) до 19,5 (при α = 1,4). При числах Ka > 5 и Da < 10 происходит прекращение горения. Таким образом, для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей, характеризующихся увеличенной шириной зоны химических реакций и низкой скоростью распространения пламени, целесообразно использовать водород в качестве промотирующей добавки.

Заключение

Conclusion

В результате проведенной работы построена диаграмма Борги – Питерса. Показано, что добавление водорода в бедную метановоздушную смесь приводит к смещению расчетных точек из зоны, в которой фронт пламени сильно разорван турбулентными вихрями, к зоне, в которой влияние турбулентности на структуру фронта пламени слабо выражено.

Получены численные значения критериев Карловица и Дамкелера, оценивающих влияние промотирующей добавки водорода на режим турбулентного горения в судовом поршневом двигателе внутреннего сгорания. Выявлено, что добавление водорода в бедную метановоздушную смесь в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Дамкелера и уменьшению критерия Карловица.

При этом чем выше концентрация водорода в метановоздушной смеси, тем сильнее проявляется выявленная закономерность. Это свидетельствует об увеличении скорости химических реакций во фронте пламени, в результате снижается негативное влияние турбулентных вихрей на фронт пламени и сгорание в двигателе становится более стабильным.

Список использованной литературы

1. Информационно-справочный материал о мировых тенденциях развития применения СПГ в качестве топлива на водном транспорте. [Б.м.] : Газпром, 2019. 73 с.

2. *Беседин С.Н., Васильева Е.В.* Применение сжиженного природного газа на флоте // Труды Крыловского государственного научного центра. 2021. Спец. вып. 1. С. 343–344. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-343-344.
3. *Хорошев В.Г., Попов Л.Н., Гатин Р.И.* Перспективы использования альтернативных видов топлива в судовых энергетических установках // Труды Крыловского государственного научного центра. 2019. Вып. 4(390). С. 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202.
4. Подведены итоги летней навигации СПГ-судна «Чайка» // Газпром СПГ технологии : [сайт]. 2024. 24 ноября. URL: https://www.gspgt.ru/tpost/podvedeny-itogi-letnej-navigaczii-spg-sudna-chajka/ (дата обращения: 19.12.2024).
5. LPG for marine engines. The marine alternative fuel : Commercial, passenger, offshore boats/ships, recreational crafts and other boats / *G. Nikolaou* [et al.] ; World LPG Association. Neuilly-sur-Seine, 2021. 142 p.
6. *Dev S.* An Investigation of premixed and lean combustion in engines : Master theses / University of Windsor. Windsor, 2018. XXIII, 205 p.
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 / *А.П. Шайкин, П.В. Ивашин, И.Р. Галиев, А.Д. Дерячев.* Самара : Изд-во СамНЦ РАН, 2016. 259 с.
8. *Algayyim S., Saleh K.* Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: a review // Fuel. 2024. Vol. 362. P. 130844, 26 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130844.
9. Hydrogen as a fuel for spark ignition combustion engines – state of knowledge and concept / *J. Matla, A. Kazmierczak, P. Haller, M. Trocki* // Combustion Engines. 2024. Vol. 196, No. 1. P. 73–79. DOI: 10.19206/CE-171541.
10. *Abdelhameed E., Tashima H.* Experimental study on the effects of methane-hydrogen jet as direct injected fuel in marine diesel engine // Energy. 2023. Vol. 267. P. 126569. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126569.
11. Experimental evaluation of methane-hydrogen mixtures for enabling stable lean combustion in spark-ignition engines for automotive applications / *S. Molina, R. Novella, J. Gomez-Soriano, M. Olcina-Girona.* Warrendale : Society of Automotive Engineers, 2022. (SAE Technical Paper ; No. 2022-01-0471). DOI: 10.4271/2022-01-0471.
12. *Mitu M., Razus D., Schroeder V.* Laminar burning velocities of hydrogen-blended methane–air and natural gas–air mixtures, calculated from the early stage of P(T) records in a spherical vessel // Energies. 2021. Vol. 14, No. 22. P. 7556 (p. 1–16). DOI: 10.3390/en14227556.
13. Новое в международной политике снижения эмиссии парниковых газов и необходимые мероприятия в морском секторе. Часть 3. Альтернативное топливо как мера для достижения целевых показателей эмиссии парниковых газов / *В.В. Магаровский, В.Н. Половинкин, А.В. Пустошный, О.В. Савченко* // Труды Крыловского государственного научного центра. 2023. Вып. 4(406). С. 174–190.
14. *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New-York : McGraw-Hill, 2018. 1056 p.
15. 0D modeling aspects of flame stretch in spark ignition engines and comparison with experimental results / *S. Demesoukas* [et al.] // Applied Energy. 2016. Vol. 179. P. 401–412. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.007.
16. CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H2-doping conditions / *M. Baratta, S. Chiriches, P. Goel, D. Misul* // Transportation Engineering. 2020. Vol. 2. P. 100018, 12 p. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.

References

1. Information and reference material on global trends in the development of LNG use as fuel in water transport. Gazprom, 2019. 73 p. (*in Russian*).
2. *Besedin S.N., Vasileva E.V.* Use of liquefied natural gas in the fleet // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2021. Special Issue 1. P. 343–344. DOI: 10.24937/2542-2324-2021-1-S-I-343-344 (*in Russian*).
3. *Khoroshev V., Popov L., Gatin R.* Prospects of alternative fuels for marine power plants // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2019. Vol. 4(390). P. 194–202. DOI: 10.24937/2542-2324-2019-4-390-194-202 (*in Russian*).
4. The results of the summer navigation of the LNG vessel Chaika have been summed up // Gazprom LNG Technologies LLC : [site]. 2024. November 24. URL: https://www.gspgt.ru/tpost/podvedeny-itogi-letnej-navigaczii-spg-sudna-chajka/ (Accessed: 19.12.2024) (*in Russian*).
5. LPG for marine engines. The marine alternative fuel : Commercial, passenger, offshore boats/ships, recreational crafts and other boats / *G. Nikolaou* [et al.] ; World LPG Association. Neuilly-sur-Seine, 2021. 142 p.
6. *Dev S.* An Investigation of premixed and lean combustion in engines : Master theses / University of Windsor. Windsor, 2018. XXIII, 205 p.
7. Flame propagation characteristics and their influence on the formation of unburned hydrocarbons and nitrogen oxide in exhaust gases when adding hydrogen to the

fuel-air mixture of spark-ignition power plants / *A.P. Shaikin, P.V. Ivashin, I.R. Galiev, A.D. Deryachev*. Samara : SRC RAS, 2016. 259 p. (*in Russian*).

8. *Algayyim S., Saleh K.* Influence of natural gas and hydrogen properties on internal combustion engine performance, combustion, and emissions: a review // Fuel. 2024. Vol. 362. P. 130844, 26 p. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130844.
9. Hydrogen as a fuel for spark ignition combustion engines – state of knowledge and concept / *J. Matla, A. Kazmierczak, P. Haller, M. Trocki* // Combustion Engines. 2024. Vol. 196, No. 1. P. 73–79. DOI: 10.19206/CE-171541.
10. *Abdelhameed E., Tashima H.* Experimental study on the effects of methane-hydrogen jet as direct injected fuel in marine diesel engine // Energy. 2023. Vol. 267. P. 126569. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126569.
11. Experimental evaluation of methane-hydrogen mixtures for enabling stable lean combustion in spark-ignition engines for automotive applications / *S. Molina, R. Novella, J. Gomez-Soriano, M. Olcina-Girona.* Warrendale : Society of Automotive Engineers, 2022. (SAE Technical Paper ; No. 2022-01-0471). DOI: 10.4271/2022-01-0471.
12. *Mitu M., Razus D., Schroeder V.* Laminar burning velocities of hydrogen-blended methane–air and natural gas–air mixtures, calculated from the early stage of P(T) records in a spherical vessel // Energies. 2021. Vol. 14, No. 22. P. 7556 (p. 1–16). DOI: 10.3390/en14227556.
13. Novelties in international policy for reducing level of green house gas emission and required measures in marine sector. Part 3. Alternative fuels as a measure to reach target levels of green house gas emissions // *V.V. Magarovsky, V.N. Polovinkin, A.V. Pustoshny, O.V. Savchenko* // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2023. Vol. 4(406). P. 174–190 (*in Russian*).
14. *Heywood J.B.* Internal Combustion Engine Fundamentals. 2nd ed. New-York : McGraw-Hill, 2018. 1056 p.
15. 0D modeling aspects of flame stretch in spark ignition engines and comparison with experimental results / *S. Demesoukas* [et al.] // Applied Energy. 2016. Vol. 179. P. 401–412. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.007.
16. CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H2-doping conditions / *M. Baratta, S. Chiriches, P. Goel, D. Misul* // Transportation Engineering. 2020. Vol. 2. P. 100018, 12 p. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.

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.), Associate Professor of Internal Combustion Engines and Diesel Installations Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: sbs777@yandex.ru.

Поступила / Received: 17.09.24
Принята в печать / Accepted: 04.02.25
© Галиев И.Р., 2025