

СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ И ИХ ЭЛЕМЕНТЫ (ГЛАВНЫЕ И ВСПОМОГАТЕЛЬНЫЕ)

DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794

PATTERNS OF LEAN METHANE-AIR MIXTURES COMBUSTION IN PISTON ENGINE

I. R. Galiev

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russian Federation

The article is devoted to the study of the patterns of combustion of lean methane-air mixtures in marine internal combustion engine. Literature review shows that the implementation of combustion technology for a homogeneous lean methane-air mixture will increase the compression ratio, reduce fuel consumption and improve the environmental engine performance. However due to an increase in misfires and a decrease in the speed of flame propagation, the combustion of lean methane-air mixtures remains an unresolved problem. The article studies the influence of the excess air coefficient (from 1 to 1.4) on the turbulent combustion regime (assessed by the Karlowitz and Damkoehler criteria), the completeness and rate of fuel combustion. It was revealed that depletion of the air-fuel mixture under conditions of intense turbulence leads to an increase in the Karlowitz criterion and a decrease in the Damköhler criterion. This indicates that the rate of chemical reactions in the flame front decreases, as a result of which the combustion process is characterized by stretching and rupture of the flame front. Therefore, to intensify the combustion of lean methane-air mixtures, it is advisable to increase the average speed of the vortex flow, and not the intensity of turbulence. A study of the influence of the excess air coefficient on the completeness and rate of fuel combustion showed that depletion of the mixture leads to a decrease in the completeness of fuel combustion from 93.5 % (at $\alpha=1$) to 83 % (at $\alpha=1.4$). The combustion rates also decrease and their maximum values shift from 13° (at $\alpha=1$) to 24° (at $\alpha=1.4$) degrees after top dead center. Therefore for efficient engine operation on lean mixtures, it is necessary to increase the fuel combustion rate through additional swirling of the gas-air mixture or the use of combustion promoters.

Key words: methane-air mixture, gas piston engine, excess air coefficient, Karlowitz number, Damkoehler number, Borghi-Peters diagram, indicator diagram, completeness of fuel combustion, combustion rate.

For citation:

Galiev, Ildar R. "Patterns of lean methane-air mixtures combustion in piston engine" *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 16.5 (2024): 784–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794.

УДК 621.43.074

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЖИГАНИЯ БЕДНЫХ МЕТАНОВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

И. Р. Галиев

Санкт-Петербургский государственной морской технической университет,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Статья посвящена изучению закономерностей сжигания бедных метановоздушных смесей в судовых двигателях внутреннего сгорания. Выполненный обзор литературы показал, что реализация технологии сжигания гомогенной бедной метановоздушной смеси позволит повысить степень сжатия, снизить расход топлива и улучшить экологические показатели двигателя. Однако, из-за увеличения пропусков зажигания и снижения скорости распространения пламени, сжигание бедных метановоздушных смесей остается пока нерешенной задачей. В статье изучено влияние коэффициента избытка воздуха (от 1 до 1,4) на режим турбулентного горения (оцениваемый критериями Карловица и Дамкелера), а также полноту и скорость сгорания топлива. Выявлено, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсиф-

ной турбулентности приводит к увеличению критерия Карловица и уменьшению критерия Дамкелера, что свидетельствует об уменьшении скорости химических реакций во фронте пламени. В результате процесс сгорания характеризуется растяжениями и разрывами фронта пламени. Поэтому для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности. Изучение влияния коэффициента избытка воздуха на полноту и скорость сгорания топлива показало, что обеднение смеси приводит к уменьшению полноты сгорания топлива с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Значения скорости сгорания также уменьшается, а их максимальные значения смещаются с 13° (при $\alpha = 1$) до 24° (при $\alpha = 1,4$) градусов после верхней мертвой точки. Сделан вывод о том, что для эффективной работы двигателя на бедных смесях необходимо увеличивать скорость сгорания топлива за счет дополнительной закрутки газозооушной смеси или применения промоторов горения.

Ключевые слова: метановоздушная смесь, газопоршневой двигатель, коэффициент избытка воздуха, критерий Карловица, критерий Дамкелера, диаграмма Borghi — Peters, индикаторная диаграмма, полнота сгорания топлива, скорость сгорания.

Для цитирования:

Галиев И. Р. Закономерности сжигания бедных метановоздушных смесей в поршневых двигателях / И. Р. Галиев // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2024. — Т. 16. — № 5. — С. 784–794. DOI: 10.21821/2309-5180-2024-16-5-784-794.

Введение (Introduction)

В связи с постоянным ростом цен на судовое топливо и законодательным ужесточением экологических требований к отработавшим газам двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с каждым годом наблюдается рост популярности применения в качестве топлива метана (природного газа). К положительным свойствам природного газа относят: высокое октановое число (105–110); низкую (по сравнению с бензином и дизельным топливом) стоимость; низкую токсичность отработавших газов; широкие концентрационные пределы воспламенения и распространения пламени; повышение ресурса моторного масла; снижение эксплуатационных расходов судна (20–50 %). Поэтому многие мировые (MTU, MAN, Wartsila и др.) и отечественные (Коломенский завод, РУМО, Волжский дизель и др.) производители судовых двигателей имеют в своей линейке газопоршневые двигатели. Аналитические^{1,2} и научные [1]–[3] обзоры показывают, что использование природного газа в судовом двигателестроении будет с каждым годом расти. Поэтому исследования в данной области являются актуальной задачей. При конвертации дизелей на природный газ их дополнительно оснащают системой зажигания топлива и газобаллонным оборудованием. Для исключения возникновения детонации метана уменьшают степень сжатия двигателя с помощью фрезеровки поршней, установки дополнительной прокладки под головку блока цилиндров, укорочения стержня шатуна, установки новых поршней с оптимизированной для сжигания природного газа формой днища поршня. Штатная камера сгорания конвертируемого на природный газ дизельного двигателя оптимизирована для впрыска и последующего гетерогенного сгорания дизельного топлива. Для эффективной работы газового ДВС необходимо изменить форму днища поршня, чтобы получить характеристики турбулентности потока, обеспечивающие низкую токсичность отработавших газов и высокий КПД двигателя.

Сжигание гомогенных стехиометрических смесей метана в судовых двигателях с искровым зажиганием является достаточно распространенным решением [4]. Вместе с тем модернизация двигателей внутреннего сгорания, направленная на снижение расхода топлива, требует создания технологии сжигания бедных топливовоздушных смесей [5]. Использование бедной топливовоздушной смеси уменьшает склонность к детонации, поэтому становится возможной работа ДВС с высокими степенями сжатия ($\epsilon > 12$). Кроме того, 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 наблюдается уменьшение

¹ СПГ как судовое топливо. Информационный бюллетень. СПб: Газпром экспорт, 2021. 24 с.

² Информационно-справочный материал о мировых тенденциях развития применения СПГ в качестве топлива на водном транспорте. Газпром, 2019. 73 с.

концентрации топлива и, как следствие, уменьшение скорости распространения пламени, увеличение времени сгорания и цикловой неидентичности рабочего процесса. Также анализ публикаций выявил, что одним из недостатков применения бедных метановоздушных является сложность использования трехкомпонентного каталитического нейтрализатора из-за наличия кислорода в выхлопных газах. Все это указывает на то, что реализация технологии сжигания гомогенной бедной метановоздушной смеси остается все еще нерешенной задачей.

При работе газопоршневого двигателя на бедных топливовоздушных смесях увеличение скорости и турбулентности потока может обеспечить устойчивую работу двигателя, поскольку крупномасштабные турбулентные потоки, формируемые в камере сгорания двигателя, 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. Большой вклад в изучение закономерностей процесса сгорания бедных топливовоздушных смесей в условиях интенсивной турбулентности внесли ученые из Honda R&D [6]. При работе двигателя с $\alpha = 1,47$ была выявлена нестабильность горения топлива, выраженная в изменении трехмерной структуры пламени (т. е. размера и формы фронта пламени) в каждом цикле работы двигателя.

Применение оптических методов диагностики показало, что ядро пламени в первой фазе сгорания, т. е. у электродов свечи зажигания, имеет несферическую форму, что указывает на сильное влияние крупномасштабных турбулентных вихрей. Вращательное движение вихревого потока поперек оси цилиндра (в англоязычной литературе именуемым «tumble») способствует перемещению ядра пламени из межэлектродного зазора свечи зажигания в объем камеры сгорания, что приводит к уменьшению продолжительности первой фазы сгорания. Была выявлена корреляция между скоростью пламени и средней скоростью вихревого потока вблизи свечи зажигания. Увеличение средней скорости вихревого потока и интенсивности турбулентности приводит к увеличению скорости распространения пламени и уменьшению общей продолжительности сгорания.

Аналогичные результаты, полученные учеными из Национального университета Чунгнам (Ю. Корея) [7] и Научно-исследовательского института перспективных исследований (AMRI) [8], выявили следующее: турбулентность, генерируемая пламенем, выше при сжигании стехиометрических смесей в отличие от бедных; усиление турбулентности (за счет профилирования впускного канала) уменьшает продолжительность сгорания бедной топливовоздушной смеси ($\alpha = 1,2$); обеднение горючей смеси приводит к уменьшению скорости распространения пламени. Одной из проблем сгорания бедных смесей является нестабильность сгорания и пропуски зажигания при увеличении коэффициента избытка воздуха. Исследования, проведенные в Высшей школе науки и технологий университета Кейо (Япония), показали эффективность использования системы зажигания с увеличенной энергией искрового разряда и многократного искрового разряда для интенсификации химических процессов в первой фазе сгорания бедной топливовоздушной смеси [9]. При этом авторы исследования отмечают, что увеличение скорости распространения пламени в первой фазе сгорания способствует интенсификации сгорания во второй фазе сгорания и уменьшению общей продолжительности сгорания. Таким образом, анализ литературы показал перспективность применения гомогенных бедных метановоздушных смесей в судовых двигателях. Исследованиями в данной области занимаются ученые ведущих мировых университетов и технологических компаний. Создание эффективной технологии сжигания бедных смесей требует глубокого понимания механизма распространения пламени и взаимодействия его с характеристиками турбулентности.

Целью работы является изучение влияния коэффициента избытка воздуха α от 1 до 1,4 на режим турбулентного горения, оцениваемый критериями Карловица и Дамкелера, а также полноту и скорость сгорания топлива.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Работа проводилась с использованием исследовательского одноцилиндрового двигателя марки «УИТ-85». Данный тип двигателя обладает низкой цикловой неидентичностью, что позволяет получить высокую точность измерений. Частота вращения коленчатого вала $n = 900$ мин⁻¹. Угол опережения зажигания был равен 13° до верхней мертвой точки (ВМТ). В качестве топлива использовался сжатый природный газ с содержанием метана более 95 %. Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по формуле

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

где G_{air} — расход воздуха, кг/ч;

G_{cng} — расход природного газа, кг/ч;

l_{cng} — теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 кг природного газа.

Изменение коэффициента избытка воздуха осуществлялось увеличением / уменьшением расхода природного газа, при этом расход воздуха не изменялся и был равен $G_{air} = 14$ кг/ч.

Регистрация давления в камере сгорания проводилась пьезоэлектрическим датчиком давления. Определение скорости и ширины пламени осуществлялось с применением двух ионизационных датчиков, расположенных в цилиндре двигателя. Более подробно методика проведения экспериментов, схема подачи природного газа в двигатель и схема обработки сигналов с датчика давления и ионизационных датчиков изложены в ранее опубликованных работах [10], [11].

Пульсационная скорость рассчитывалась с использованием значений кинетической энергии турбулентности k :

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

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

$$L_i = \frac{kU'}{\varepsilon};$$

$$\eta = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{0,25},$$

где L_i — интегральный масштаб турбулентности;

η — масштаб Колмогорова;

v — кинематическая вязкость;

ε — скорость диссипации энергии.

Вычисление характеристик турбулентности (k и ε) в цилиндре двигателя выполнено в работе с использованием $k - \omega$ SST (*Shear Stress Transport*) модели турбулентности в интервале углов положения коленчатого вала от -15° до 50° после ВМТ. Модель турбулентности является комбинацией двух типов моделей: стандартной $k - \varepsilon$, используемой для моделирования турбулентности в объеме камеры сгорания и $k - \omega$ модели Уилкокса, применяемой для моделирования пристеночной турбулентности [13]:

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

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

где k — кинетическая энергия турбулентности;

μ_t — турбулентная вязкость;

σ_{k3} и $\sigma_{\omega3}$ — 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.

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

Результаты (Results)

Влияние коэффициента избытка воздуха на режим горения. Проведенные исследования показали, что вихревые потоки в цилиндре ДВС характеризуются значительной турбулентностью. Турбулентность играет важную роль в приготовлении топливно-воздушной смеси и ее последующем сгорании. Вихри движутся в случайных направлениях, улучшая перемешивание топлива и воздуха. Когда топливно-воздушная смесь воспламеняется, пламя распространяется в условиях интенсивной турбулентности. В отличие от ламинарного пламени, скорость которого можно охарактеризовать исключительно химическими свойствами горючего и окислителя, т. е. воздуха, турбулентную скорость горения определить гораздо труднее. Это связано с тем, что она зависит от характеристик турбулентности вихревого потока в цилиндре ДВС, которые, в свою очередь, зависят от конструкции впускного канала, формы поршня и головки блока цилиндров. Турбулентность можно определить как колеблющуюся составляющую скорости, добавляемую к средней скорости потока. Скорость, температура и давление в условиях интенсивной турбулентности изменяются неравномерно. Это приводит к тому, что площадь поверхности пламени представляет собой искривленный фронт пламени, что увеличивает массовую скорость сгорания.

Влияние коэффициента избытка воздуха на режим горения рассматривается с применением диаграммы *Borghi — Peters* (рис. 1).

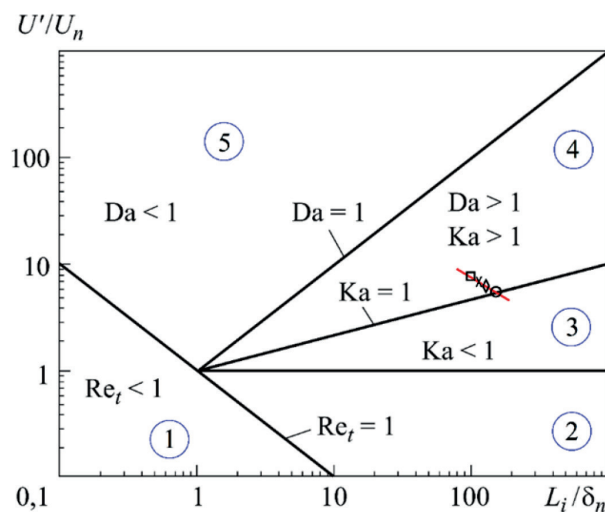


Рис. 1. Диаграмма *Borghi-Peters*: $\circ$ — $\alpha=1$; $\diamond$ — $\alpha=1,2$; $\times$ — $\alpha=1,3$; $\square$ — $\alpha=1,4$

Условные обозначения:

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

Данная диаграмма наглядно показывает влияние физико-химических факторов на процесс горения [13]. Линии на диаграмме разделяют процесс горения на пять 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 сильная, что зона химических реакций сильно размывается (критерий Дамкелера $Da < 1$, критерий Карловица $Ka \gg 1$). 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 по сравнению с зоной химических реакций ($Ka < 1$, $Da \gg 1$), чтобы проникнуть в структуру пламени и влиять на процессы термодиффузии в нем (рис. 2, а). 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. В 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. $Ka = 1$.

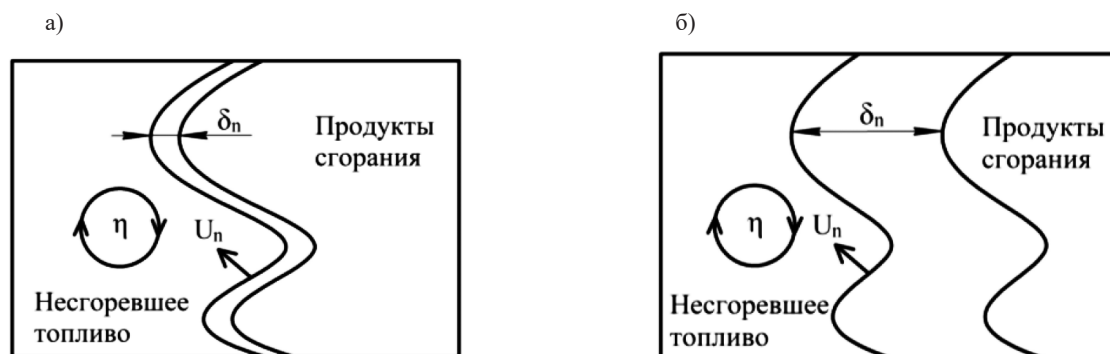


Рис. 2. Влияние коэффициента избытка воздуха на структуру пламени:
а — $\alpha = 1$; б — $\alpha = 1,4$

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. 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, б). Для численной оценки режима горения топлива в ДВС используют критерии Дамкелера (Da) и Карловица (Ka). Критерий Карловица широко применяется в физике горения в качестве оценочного фактора для определения условий прекращения горения за счет растяжения пламени при большой интенсивности турбулентности [14], [15]. Следует отметить, что для изучения механизма погасания пламени, из-за тепловых потерь при малой интенсивности турбулентности, необходимо использовать число Пекле, равное отношению конвективного переноса тепла к молекулярному. Критерий Ka рассчитывают как отношение характерного времени химической реакции к характерному времени течения:

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

где T_n — масштаб времени ламинарного пламени;
 T_K — масштаб времени Колмогорова;
 δ_n — ширина ламинарного фронта пламени;
 η — масштаб Колмогорова.

Критерий Дамкелера 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:

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

где T_{flow} — масштаб времени турбулентности;

T_{chem} — продолжительность химических реакций во фронте пламени;

U_n — нормальная (ламинарная) скорость распространения пламени;

L_i — интегральный масштаб турбулентности;

U' — пульсационная скорость воздушного потока.

На рис. 3 показана зависимость критериев Ka и Da от коэффициента избытка воздуха, откуда видно, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Ka с 1,2 (при $\alpha = 1$) до 3,4 (при $\alpha = 1,4$) и уменьшению Da с 37 (при $\alpha = 1$) до 12 (при $\alpha = 1,4$). Расчетные точки, определяющие режим горения на диаграмме *Borghi — Peters*, смещаются из зоны 3 (начало разрыва фронта пламени) в зону 4 (разорванный фронт пламени). Это свидетельствует о том, что уменьшается скорость химических реакций во фронте пламени, что приводит к его растяжению, т. е. увеличению ширины зоны химических реакций, и разрыву. При числах $Ka > 5$ и $Da < 10$ происходит прекращение горения. Таким образом, для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей, характеризующихся увеличенной шириной зоны химических реакций, целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности.

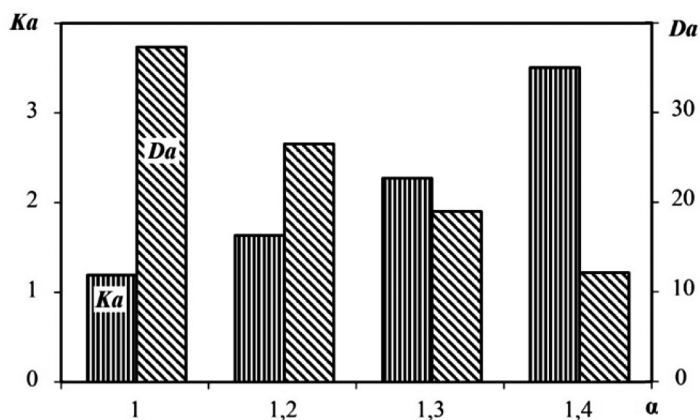


Рис. 3. Зависимость критериев Ka и Da от коэффициента избытка воздуха

Влияние коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива. Расчет полноты сгорания топлива осуществлялся с применением экспериментальной индикаторной диаграммы давления и использованием уравнения первого закона термодинамики:

$$\chi = \frac{dQ}{H_u G_u} 100 \%;$$

$$dQ = dU + p dV,$$

где Q — количество теплоты, затрачиваемой на совершение работы и увеличение внутренней энергии;

H_u — теплота сгорания топлива;

G_u — цикловая подача топлива;
 dU — внутренняя энергия;
 p — давление в камере сгорания;
 V — объем камеры сгорания.

Температура в камере сгорания рассчитывалась с применением уравнения состояния реального газа по формулам:

$$T = \frac{pV}{GR};$$

$$R = R_u(1 - \chi) + R_b;$$

$$R_u = \frac{R_{cng} G_{cng} + R_{air} G_{air} + R_b \gamma (G_{cng} + G_{air})}{G_{cng} + G_{air} + \gamma (G_{cng} + G_{air})};$$

$$R_b = \frac{R_{CO} G_{CO} + R_{CO_2} G_{CO_2} + R_{H_2} G_{H_2} + R_{H_2O} G_{H_2O} + R_{N_2} G_{N_2} + R_{O_2} G_{O_2}}{G_{CO} + G_{CO_2} + G_{H_2} + G_{H_2O} + G_{N_2} + G_{O_2}},$$

где G — масса рабочего тела в камере сгорания;

R — газовая постоянная смеси газов;

R_u — газовая постоянная несгоревшей топливоздушной смеси;

R_b — газовая постоянная отработавших газов;

γ — коэффициент остаточных газов.

Скорость сгорания метановоздушной смеси рассчитывалась по формуле

$$w = \frac{d\chi}{d\varphi} = 6,908 \frac{m+1}{\varphi_z} \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^m \cdot \exp \left[-6,908 \left(\frac{\varphi}{\varphi_z} \right)^{m+1} \right],$$

где φ — угол поворота коленчатого вала двигателя;

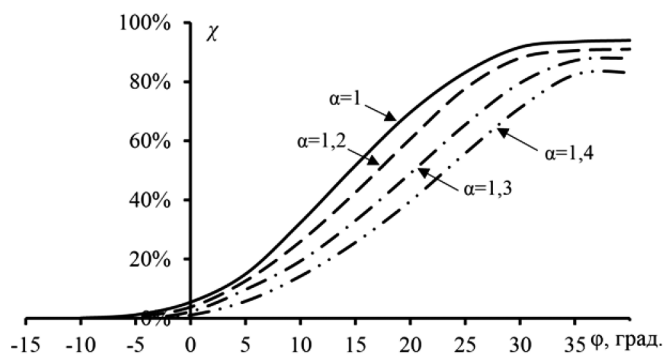
φ_z — продолжительность сгорания топлива;

m — показатель сгорания.

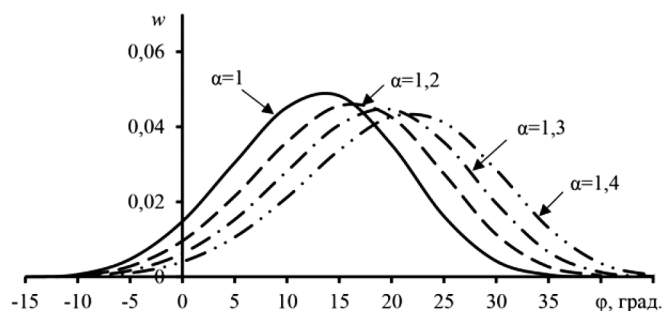
На рис. 4 показано влияние коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива в камере сгорания двигателя. При обеднении смеси наблюдается уменьшение полноты сгорания топлива (рис. 4, а) с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Это связано с тем, что обеднение смеси приводит к уменьшению количества выделившегося при сгорании тепла и скорости химических реакций во фронте пламени, в результате процесс сгорания топлива становится более продолжительным. На рис. 4, б видно, что при обеднении смеси с $\alpha = 1$ до $\alpha = 1,4$ значения скоростей сгорания уменьшаются, а их максимальные значения, т. е. число активных центров химических реакций, смещаются на 11° после ВМТ. Догорание топлива при $\alpha > 1,1$ происходит во время такта расширения, т. е. уменьшающихся значений давлений и температур и увеличивающейся площади и объема камеры сгорания. При $\alpha > 1,5$ значение тепловыделения во фронте пламени становится меньше теплоотдачи в холодные стенки цилиндра, критерий $Ka > 5$, критерий $Da < 10$, и пламя гаснет. Поэтому для эффективной работы двигателя на бедных смесях необходимо увеличивать угол опережения зажигания, скорость сгорания топлива за счет дополнительной закрутки газовой смеси (например, использования поршней с большим *squish*-отношением) и скорость химических реакций за счет применения промоторов горения (например, водорода).

Следует отметить, что сжигание бедных смесей имеет и положительный эффект. В частности, на рис. 4, в показано уменьшение температуры в камере сгорания с $T = 2047$ К (при $\alpha = 1$) до $T = 1665$ К при ($\alpha = 1,4$). В результате уменьшается концентрация оксидов азота, образующихся по термическому механизму Я. Б. Зельдовича и уменьшается теплонапряженность деталей цилиндропоршневой группы.

а)



б)



в)

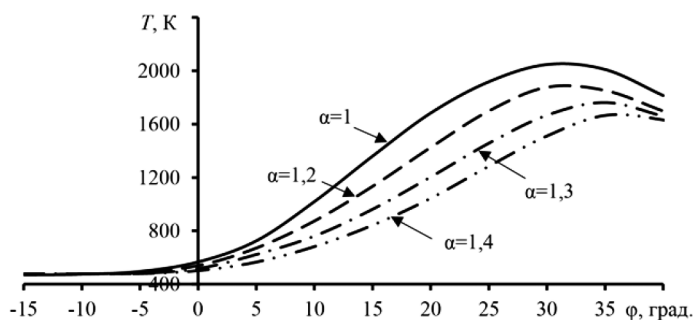


Рис. 4. Влияние коэффициента избытка воздуха:
а — на полноту сгорания топлива; б — на скорость сгорания топлива;
в — на температуру в камере сгорания

Таким образом, изучение влияния коэффициента избытка воздуха на полноту, скорость и температуру сгорания топлива показало, что обеднение смеси с $\alpha = 1$ до $\alpha = 1,4$ приводит к уменьшению полноты сгорания топлива на 10,5 %, скорости сгорания на 14 % и температуры на 18,6 %.

Выводы (Summary)

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы

1. Выявлено, что обеднение топливовоздушной смеси в условиях интенсивной турбулентности приводит к увеличению критерия Карловица с 1,2 (при $\alpha = 1$) до 3,4 (при $\alpha = 1,4$) и уменьшению критерия Дамкелера с 37 (при $\alpha = 1$) до 12 (при $\alpha = 1,4$). Это свидетельствует о том, что уменьшается скорость химических реакций во фронте пламени, в результате процесс сгорания характеризуется растяжениями и разрывами фронта пламени. Поэтому для интенсификации сгорания бедных метановоздушных смесей целесообразно увеличивать среднюю скорость вихревого потока, а не интенсивность турбулентности.

2. Исследование закономерностей влияния коэффициента избытка воздуха на полноту и скорость сгорания топлива показало, что обеднение смеси приводит к уменьшению полноты

сгорания топлива с 93,5 % (при $\alpha = 1$) до 83 % (при $\alpha = 1,4$). Значения скоростей сгорания также уменьшаются, а их максимальные значения смещаются на 11° после ВМТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безюков О. К. Газомоторное топливо на водном транспорте / О. К. Безюков, В. А. Жуков, О. И. Ященко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 6. — С. 31–39. — EDN TDOCEH.
2. Арапова З. М. Анализ возможности перевода водного транспорта на сжиженный природный газ / З. М. Арапова, М. Ш. Арабов, А. А. Волкова, П. А. Саадати // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. — 2021. — № 3. — С. 60–73. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-3-60-73. — EDN ORSAMW.
3. Ватолин Д. С. Оценка эффективности топливоподготовки на судах, использующих в качестве топлива сжиженный природный газ / Д. С. Ватолин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. — 2023. — Т. 15. — № 3. — С. 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512. — EDN RRSEXY.
4. Живлюк Г. Е. Экологическая безопасность энергетических установок: двухтопливные и газовые двигатели / Г. Е. Живлюк, А. П. Петров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2022. — Т. 14. — № 3. — С. 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462. — EDN IWDJGT.
5. Shouvik D. An Investigation of Premixed and Lean Combustion in Engines. Grand PhD diss. University of Windsor. — 2018. — 229 p.
6. Aleiferis P. G. Cyclic Variations of Initial Flame Kernel Growth in a Honda VTEC-E Lean-Burn Spark-Ignition Engine / P. G. Aleiferis // SAE Technical Paper. — Is. 2000-01-1207. — 2000. — P. 112–149. DOI: 10.4271/2000-01-1207.
7. Kang K. Y. The Effects of Tumble Flow on Lean Burn Characteristics in a Four-Valve SI Engine / K. Y. Kang // SAE Technical Paper. — Is. 970791. — 1997. — P. 981–989. DOI: 10.4271/970791.
8. Arcoumanis C. Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine / C. Arcoumanis // SAE Transactions. — 1994. — Is. 940475. — P. 197–211. DOI: 10.4271/940475.
9. Jung D. An Investigation of Multiple Spark Discharge Using MultiCoil Ignition System for Improving Thermal Efficiency of Lean SI Engine Operation / D. Jung, N. Iida // Applied Energy. — 2018. — Is. 212. — P. 322–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.032.
10. Шайкин А. П. 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. — Самара: СНЦ РАН, 2016. — 259 с. — EDN YTMVBV.
11. Shaikin A. P. On the relationship of the width of the turbulent combustion zone with the fuel composition, pressure, propagation speed, and electrical conductivity of the flame / A. P. Shaikin, I. R. Galiev // Technical Physics. — 2020. — № 7. — P. 1020–1023. DOI: 10.1134/S106378422007018X.
12. Галиев И. Р. CFD-моделирование газодинамических процессов при профилировании камеры сгорания газопоршневого двигателя / И. Р. Галиев. — СПб.: СПбГМТУ, 2024. — 104 с. — EDN BVJGON.
13. Lorenzo M. D. New One Shot Engine Validation Based on Aerodynamic Characterization and Preliminary Combustion Tests / M. D Lorenzo // Flow Turbulence and Combustion. — 2021. — Is. 106. — P. 1801–1810. DOI:10.1007/s10494-020-00185-3.
14. Baratta M. CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H₂-doping conditions / M. Baratta // Transportation Engineering. — 2020. — Is. 2. — 12 p. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.
15. Chung Y. H. Fire Safety Evaluation of High-Pressure Ammonia Storage Systems / Y. H. Chung // Energies. — 2022. — Is. 15. — P. 1123–1134. DOI: 10.3390/en15020520.

REFERENCES

1. Bezyukov, O. K., V. A Zhukov and O. I. Yashchenko “Dual-fuel engines on water transport.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. 6.28 (2014): 31–39. — EDN TDOCEH.

2. Arabova, Z. M., M. Sh. Arabov, A. A. Volkova and P. A. Saadati “Analysis of conversion of water transport engines to liquefied natural gas.” *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 3 (2021):60–73. DOI:10.24143/2073-1574-2021-3-60-73.
3. Vatolin, Dmitrii S. “Efficiency of fuel gas supply on LNG-fueled vessels.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 15.3 (2023): 501–512. DOI: 10.21821/2309-5180-2023-15-3-501-512.
4. Zhivljuk, Grigorij E., and Aleksandr P. Petrov. “Environmental safety of power plants: dual-fuel and gas engines.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 14.3 (2022): 449–462. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-449-462.
5. Shouvik, D. *An Investigation of Premixed and Lean Combustion in Engines*. University of Windsor, 2018.
6. Aleiferis, P.G. “Cyclic Variations of Initial Flame Kernel Growth in a Honda VTEC-E Lean-Burn Spark-Ignition Engine.” *SAE Technical Paper*. 2000–01–1207. (2000): 112–149. DOI: 10.4271/2000-01-1207.
7. Kang K. Y. “The Effects of Tumble Flow on Lean Burn Characteristics in a Four-Valve SI Engine.” *SAE Technical Paper*. 970791. (1997): 981–989. DOI: 10.4271/970791.
8. Arcoumanis C. “Flow and Combustion in a Four-Valve, Spark-Ignition Optical Engine.” *SAE Transactions*. 940475. (1994): 197–211. DOI: 10.4271/940475.
9. Jung D. “An Investigation of Multiple Spark Discharge Using MultiCoil Ignition System for Improving Thermal Efficiency of Lean SI Engine Operation.” *Applied Energy*. 212. (2018): 322–332. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.12.032.
10. Shaikin Alexander, Pavel Ivashin and Ildar Galiev “Kharakteristiki rasprostraneniya plameni i ikh vliyaniye na obrazovaniye nesgorevshikh uglevodorodov i oksida azota v otrabotavshikh gazakh pri dobavke vodoroda v toplivno-vozdushnyuyu smes’ energeticheskikh ustanovok s iskrovym zazhiganiyem.” / Samara: SNTS RAN, 2016.
11. Shaikin A. P., Galiev I. R. “On the relationship of the width of the turbulent combustion zone with the fuel composition, pressure, propagation speed, and electrical conductivity of the flame.” *Technical Physics*. 65.7. (2020): 1020–1023. DOI: 10.1134/S106378422007018X.
12. Galiyev Ildar *CFD-modelirovaniye gazodinamicheskikh protsessov pri profilirovanii kamery sgoraniya gazoporshnevoogo dvigatelya*. St. Petersburg: SPbGMTU, 2024.
13. Lorenzo M. D. “New One Shot Engine Validation Based on Aerodynamic Characterization and Preliminary Combustion Tests.” *Flow Turbulence and Combustion*. 106. (2021): 1801–1810. DOI:10.1007/s10494-020-00185-3.
14. Baratta M. “CFD modelling of natural gas combustion in IC engines under different EGR dilution and H₂-doping conditions.” *Transportation Engineering*. 2. (2020): 2–12. DOI: 10.1016/j.treng.2020.100018.
15. Chung Y. H. “Fire Safety Evaluation of High-Pressure Ammonia Storage Systems.” *Energies*. 15. (2022): 1123–1134. DOI: 10.3390/en15020520.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Галиев Ильдaр Ринатович —

канд. техн. наук, доцент
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский
государственной морской технический
университет»,
190121, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Лотманская, 3
e-mail: sbs777@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Galiev Ildar Rinatovich —

Ph.D., Associate Professor
St. Petersburg State Marine
Technical University,
190121, Russian Federation,
St. Petersburg,
st. Lotsmanskaya, 3
e-mail: sbs777@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 августа 2024 г.
Received: August 29, 2024.