

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ГАЗОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ (материалы конгресса CIMAC-2016)

Все более жесткие ограничения выбросов NO_x судовыми дизелями и расширение номенклатуры нормируемых вредных веществ (SO_x , CO_2 , PM) стимулируют применение в судовых энергетических установках в качестве топлива сжиженный природный газ (LNG). Природный газ как моторное топливо не содержит серы, имеет, по сравнению с дизельным топливом, более низкое содержание углерода (примерно на 25 %) и при сгорании обедненных газовых смесей практически не образует частиц углерода.

В то же время двигатели, работающие на обедненной газовой смеси, обладают двумя существенными недостатками. Первый из них — опасность перехода в режим аномального сгорания (детонации) или в режим пропуска вспышек, что ограничивает поле допустимых режимов работы двигателя. Другой недостаток связан с выбросами в атмосферу несгоревшего метана (до 0,5 % от поданного в цилиндр), оставшегося из-за гашения пламени в «мертвых» зонах камеры сгорания и вблизи относительно холодных стенок цилиндра. С учетом того, что парниковый эффект от выбросов метана в 25 раз превышает аналогичный эффект от выбросов CO_2 , преимущество использования природного газа по этому параметру может оказаться ничтожным.

В настоящем обзоре рассматриваются две новые технологии, направленные на совершенствование процесса сгорания обедненной газо-воздушной смеси в цилиндре, сокращение выбросов метана и расширение поля возможных режимов работы судового газового двигателя.

Специалистами Японского университета Кюсю (Kyushu University) предложен новый способ снижения выбросов несгоревшего метана с использованием газопроницаемой мембраны (GPM — gas permeation membrane). Мембрана GPM, установленная на впуске,

разделяет воздух для сгорания на два потока. Воздух, обогащенный кислородом (OEA — oxygen-enriched air) образуется за мембраной, при этом перед мембраной образуется воздух, обогащенный азотом (NEA — nitrogen-enriched air). Потоки с различным содержанием кислорода подаются в камеру сгорания через отдельные впускные порты. Рабочая газовая смесь на основе OEA, направленная на стенку цилиндра, сокращает дистанцию гашения пламени и выброс несгоревшего метана. Рабочая смесь на основе NEA подается в зону оси цилиндра, что способствует снижению вероятности детонации.

Интернациональная группа специалистов из Мюнхенского технического университета (Technische University Munchen) и университета Кюсю (Kyushu University) выполнила исследование горения в цилиндре двигателя обедненной газовой смеси с добавками водорода (H_2) с целью исключения пропуска вспышек и сокращения выбросов несгоревшего метана. Исследования параметров рабочего процесса были выполнены на одноцилиндровом моторном отсеке с последующей визуализацией процесса горения на машине быстрого сжатия для двух вариантов топливных смесей с содержанием $\text{H}_2 = 10\%$ и 30 моль-% (далее HNG10 и HNG30) в сравнении с горением чистого метана. Было установлено, что при работе на смеси HNG10 снижается количество выбросов CO и THC без увеличения образования NO_x . Работа на смеси HNG30 на границу детонации влияет незначительно, при этом границу пропуска вспышек удалось существенно отодвинуть. Однако при работе на смеси с большим содержанием водорода возникает опасность появления очагов самовоспламенения смеси до срабатывания свечи зажигания.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

СНИЖЕНИЕ УТЕЧЕК МЕТАНА ИЗ СУДОВОГО ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ЗА СЧЕТ СТРАТИФИКАЦИИ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА С ПОМОЩЬЮ ГАЗОПРОНИЦАЕМОЙ МЕМБРАНЫ

*Hiroshi Tajima, Daisuke TSURU,
Kyushu University*

Введение

Во всем мире наблюдается тенденция к увеличению относительной доли в топливном балансе природного газа как чистого и низкоуглеродного топлива, особенно усилившаяся после так называемой «сланцевой революции». Что касается поршневых двигателей внутреннего сгорания промышленного назначения, то здесь имеет место тенденция к расширению использования газовых двигателей с принудительным воспламенением готовой топливной смеси, что позволяет обеспечить выполнение нормативов по выбросам

NO_x без очистки отработавших газов. Все это обеспечивает газовым двигателям высокую конкурентоспособность в области электроэнергетики, особенно в пригородных местностях. Ожидается также, что в будущем газовые двигатели заменят судовые дизели, поскольку в судостроении уже сегодня действуют жесткие ограничения выбросов NO_x . Природный газ (в виде LNG) имеет низкое содержание углерода и не содержит серы, поэтому перевод судовых двигателей на газ позволит снизить выбросы CO_2 (примерно на 25 %) и твердых частиц.

В то же время двигатели, работающие на заранее приготовленной обедненной газовой смеси, обладают двумя существенными недостатками. Один из них — опасность возникновения аномального сгорания (детонации), что ограничивает мощность двигателя; другой — утечка несгоревшего метана в выпускную систему.

Учитывая, что парниковый эффект от метана в 25 раз превышает парниковый эффект от CO_2 , упомянутое выше снижение выбросов CO_2 на 25 % не дает существенного экологического эффекта. В качестве причин утечки метана называют продувку цилиндра в период перекрытия клапанов, попуски вспышек из-за наличия «переобедненных» зон в камере сгорания, а также гашение пламени в мертвых объемах камеры сгорания или в пограничном пристеночном слое, на долю которого приходится примерно половина всего объема утечек. Для ослабления данного эффекта пока существуют только паллиативные средства, например, уменьшение мертвых объемов камеры сгорания, поскольку расстояние до стенки цилиндра, на которой гаснет пламя, зависит только от химического состава рабочей смеси, и на это трудно повлиять.

В настоящей работе описан новый и радикальный способ снижения утечки метана за счет использования газопроницаемой мембраны (GPM) [1], принцип действия которой детально изложен в следующем разделе. Мембрана (GPM), размещаемая между компрессором и воздухоохладителем, обеспечивает необходимую неравномерность распределения содержания кислорода по объему камеры сгорания, за счет использования отдельных впускных окон для воздуха, обогащенного кислородом, и для воздуха, обогащенного азотом. При этом воздух, обогащенный кислородом, направляется на стенки цилиндра, что снижает дистанцию гашения пламени и, следовательно, утечку метана. Воздух, обогащенный азотом, направляется в область оси цилиндра, что способствует поддержанию постоянства значения выбросов NO_x и снижает вероятность детонации. В следующих разделах подробно описана конструкция предлагаемой системы. С использованием моделирования дана оценка ожидаемого эффекта сокращения утечки метана. Приведено описание камеры сгорания постоянного объема с расслоенным воздушным зарядом.

Система антигасящей мембраны и ее состав

Суть нового эффективного способа для предотвращения утечки метана в газовых двигателях состоит в использовании GPM для формирования нужного (неравномерного) распределения содержания кислорода по объему камеры сгорания. Поскольку данная система, которую мы назвали антигасящей мембраной (AQM — Anti Quenching Membrane), встроена в контур наддува и достаточно сложна, постараемся объяснить ее устройство более подробно.

Физический смысл дистанции гашения

Можно назвать три фактора, способствующих утечке метана, а именно: потеря части заряда во время перекрытия клапанов, наличие несгоревшего

газа в мертвых объемах и гашение пламени вблизи стенки цилиндра. Первая и вторая причины могут быть устранены за счет таких мероприятий, как изменение фаз газораспределения, заполнение мертвых объемов и т. п. Примерно половина утечек метана связана с третьей проблемой, и именно она оказывается наиболее сложной для решения. Дистанция гашения пламени — это расстояние от стенки цилиндра до зоны, в которой факел горячей смеси гаснет. Температура смеси в пределах этого расстояния падает из-за отвода тепла через стенку цилиндра в охлаждающую жидкость, причем температура стенки регулируется с помощью смазки. Основная часть несгоревших углеводородов остается в пределах дистанции гашения пламени, поэтому сокращение ее размера необходимо для снижения количества несгоревшего метана.

На рис. 1 показано соотношение между дистанцией гашения пламени и степенью эквивалентности воздушно-метановой смеси при различных концентрациях O_2 согласно классической работе В. Lewis и G. von Elbe [2]. Любое отклонение концентрации O_2 от стехиометрической приводит к увеличению дистанции гашения пламени из-за падения температуры, хотя минимальное значение дистанции гашения, по-видимому, несколько сдвигается в сторону более богатой смеси. S. Kondo [3] указывает также на то, что концентрация O_2 сильнее влияет на дистанцию гашения пламени, чем давление рабочей смеси. Из этого следует, что обогащение кислородом воздуха, направляемого на стенки цилиндра, реально может стать средством снижения утечки метана.

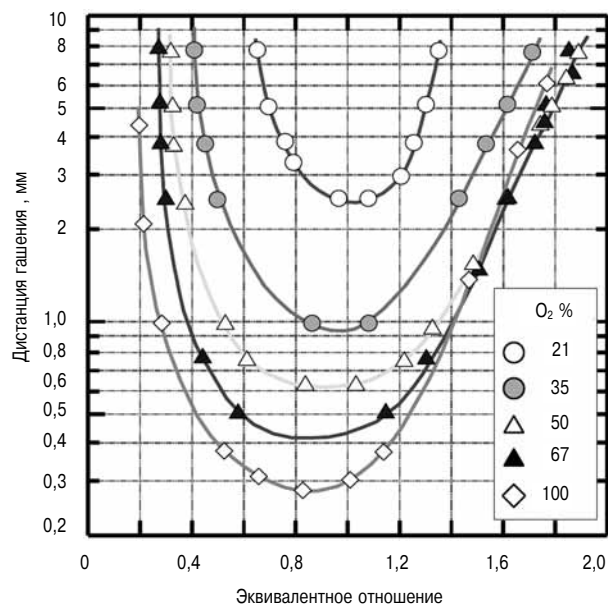


Рис. 1. Зависимость дистанции гашения пламени от степени эквивалентности метано-воздушной смеси [2]

Принцип действия газопроницаемой мембраны

Система снижения утечки метана основана на использовании газопроницаемой мембраны, способной менять состав газовой смеси, которой в данном случае является атмосферный воздух. Проницаемость мембраны для различных компонентов газовой смеси зависит от размера молекулы. В математических моделях прохождение газа через такую мембрану описывается в терминах диффузии. Молекула газа на стороне высокого давления диффундирует в мембрану, после ее прохождения происходит десорбция газа на стороне низкого давления.

Схема действия газопроницаемой мембраны показана на рис. 2. Атмосферный воздух сжимается и поступает на вход GPM, через мембрану быстрее просачиваются молекулы кислорода, поскольку по размеру они меньше молекул азота. На обратной стороне мембраны образуется воздух, обогащенный кислородом, а на стороне входа остается воздух, обогащенный азотом. Скорость прохождения воздуха определяется его расходом F , что математически выражается следующими уравнениями:

$$F_i = J_i / t_M \cdot \Delta P \cdot S_M \times 10^{-16} \quad (1)$$

$$J_i = C_i \cdot D_i, \quad (2)$$

где F_i — расход газа, m^3 (при стандартных условиях) s^{-1} ; J_i — коэффициент передачи, Barrer; t — толщина газопроницаемого пластика (материал мембраны); ΔP_i — перепад давления, кПа; S_i — площадь поверхности, m^2 ; C_i — коэффициент пропорциональности; D_i — коэффициент диффузии; Barrer — $0,752 \cdot 10^{-14}$, m^3 (при стандартных условиях) $mm^{-2} s^{-1} kPa$.

На рис. 3 изображена кривая зависимости проницаемости GPM для различных газов от размеров их молекул. В дальнейшем обогащенный кислородом воздух за мембраной будем обозначать

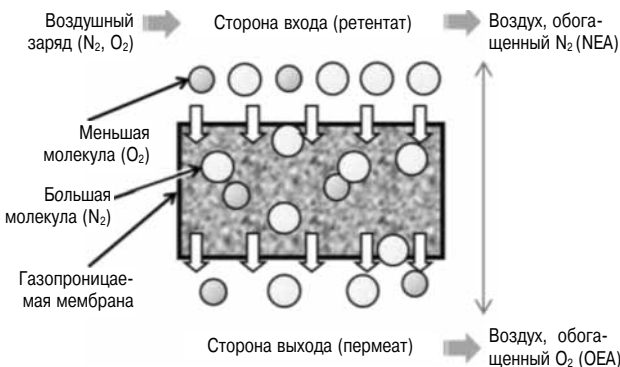


Рис. 2. Архитектура газопроницаемой мембраны и механизм ее проницаемости

Для справки. Мембранное разделение потока. Мембранные процессы разделения основываются на различной проницаемости того или иного компонента газообразной или же жидкой среды. Поток, который проходит через мембрану, называется фильтратом или пермеатом, а задержанный — концентратом или ретенатом.

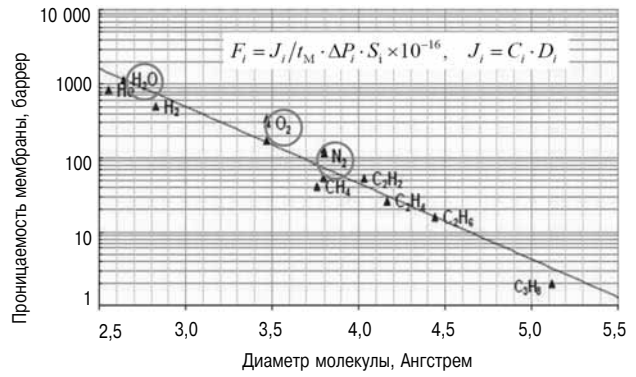


Рис. 3. Проницаемость GPM в зависимости от диаметра молекулы газа

Для справки. Barrer (Barrer) — единица коэффициента газопроницаемости. 1 Barrer = $10^{-10} cm^3(н.у.) cm cm^{-2} c^{-1} (mm рт.ст.)^{-1}$.

аббревиатурой OEA (oxygen-enriched air), а обогащенный азотом воздух перед мембраной (на стороне остатка) — аббревиатурой NEA (nitrogen-enriched air).

Пример использования GPM

Прежде чем перейти к описанию системы AQM, следует упомянуть пример реального использования GPM на практике. Н. Ohno и др. предложили систему предварительной очистки отработавших газов от NO_x с помощью GPM собственной конструкции [4]. На рис. 4 представлена конфигурация так называемой системы ORM (Oxygen Reduction Membrane), запатентованной фирмой «Asahi Kasei Engineering Corporation». Эта система осуществляет подачу NEA на всасывание главного судового двигателя, заменяя тем самым систему рециркуляции отработавших газов (EGR). Как известно, серьезной проблемой для EGR судовых двигателей является высокосернистое топливо, даже если оно соответствует требованиям S-ECA (содержание серы не более 1000 ppm). Это вызывает необходимость использования скруббера для удаления серной кислоты, которая может образовываться в отработавших газах. Действие системы ORM никак не зависит от содержания серы в топливе, поэтому данная система отлич-

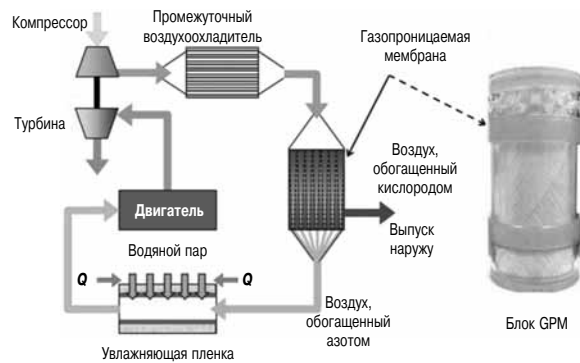


Рис. 4. Конфигурация системы ORM для мощных дизелей (с увлажнителем)

чается высокой надежностью, долговечностью и низкими эксплуатационными расходами, поскольку отпадает необходимость в таких дорогостоящих компонентах, как нейтрализатор, устройство очистки и цистерны для слива грязной воды из скруббера.

Однако в качестве устройства для снижения выбросов NO_x система ORM имеет определенные ограничения. На производство NEA расходуется мощность компрессора, при этом степень проникновения смеси через мембрану со стороны OEA на сторону NEA не превышает 0,2~0,25. Следовательно, снизить концентрацию кислорода в NEA до 19 % и менее, не перегружая компрессор, довольно трудно. По этой причине обычно возникает необходимость в дополнительном устройстве для снижения выбросов NO_x , например использование увлажнителя наддувочного воздуха, показанного на рисунке, или система впрыска водотопливной эмульсии. К тому же сбрасываемый OEA не способствует снижению выбросов NO_x , а только увеличивает потери энергии на сжатие, что является серьезным недостатком системы ORM.

Настоящий прорыв возможен только тогда, когда будет найден способ использования технологии GPM в мощных газовых двигателях, работающих на бедной смеси. В этом случае две главные проблемы, присущие газовым двигателям, будут решены соответственно за счет использования NEA (для предотвращения детонации) и OEA (для предотвращения утечки метана). Поскольку причиной детонации является слишком быстрое нарастание давления на начальной стадии процесса сгорания, NEA следует подавать в нижнюю часть рабочего объема цилиндра. И если главной причиной утечки метана является гашение пламени вблизи стенки цилиндра, OEA следует подавать именно в эту область. Возможность обеспечить раздельную подачу в цилиндр NEA и OEA, получаемых с помощью GPM, может стать большим шагом в развитии газовых двигателей, работающих на бедной смеси.

Система антигасящей мембраны

На рис. 5 показана принципиальная схема системы с антигасящей мембраной (AQM) и организации раздельной подачи компонентов в цилиндр. В системе используются две различные рабочие смеси, отличающиеся концентрацией кислорода (см. выше), поэтому данная система может стать первым примером использования сокращения дистанции гашения пламени как средства снижения утечки метана. При прохождении через мембрану GPM давление OEA снижается, поэтому перед подачей в цилиндр его необходимо «поджать», в то время как для подачи NEA этого не требуется. Это значит, что для работы AQM

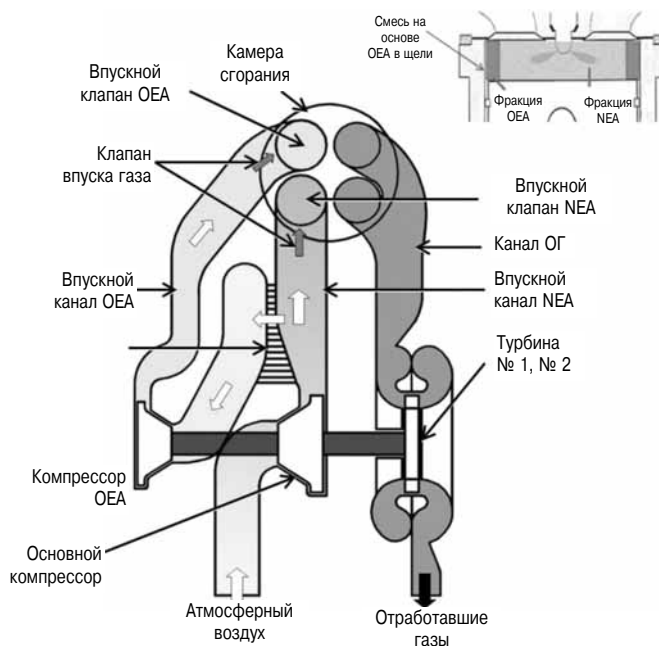


Рис. 5. Схема разделения и подачи смеси на NEA/OEA в системе AQM

нужна достаточно сложная система наддува, состоящая из двух турбокомпрессоров (ТК), причем их КПД должен быть выше стандартного, чтобы компенсировать потери мощности на сжатие. Как показано на рисунке, оба потока поступают в цилиндр раздельно, причем топливный газ подается непосредственно перед впускными клапанами.

NEA подается в центральную часть цилиндра, в результате чего недостаток кислорода в смеси отодвигает границу детонации, а также уменьшает выбросы NO_x , поскольку снижается температура сгорания. Следовательно, использование NEA в качестве рабочей смеси должно дать тот же эффект, что и EGR [5, 6]. Подача OEA осуществляется таким образом, чтобы его струя создавала закрученный поток вдоль стенки цилиндра. Это повышает качество сгорания в пристеночной области и снижает дистанцию гашения пламени. Горение метана вблизи стенки цилиндра может увеличить выбросы NO_x из-за повышения тепловыделения и, соответственно, температуры сгорания, однако предполагается, что этот эффект будет нейтрализован за счет подачи NEA. Таким образом, использование NEA/OEA позволит снизить выбросы как несгоревшего метана, так и NO_x .

Методы численного моделирования

Моделирование рабочего процесса с помощью программы GT-Power

Система AQM представляет собой принципиально новое решение, поэтому оптимизация компонентов ТК, а именно компрессора и турбины на основе существующих конструкций вряд ли возможна. Кроме того, эффект регули-

рования концентрации O_2 трудно прогнозировать. Следовательно, необходимо оценить влияние использования GPM с двумя ТК на рабочие показатели двигателя в целом, а также оценить эффект использования NEA и OEA. В настоящем исследовании использован код GT-Power для моделирования показателей рабочего процесса двигателя, разработанный фирмой «Gamma Technology Co». [7]. Данный код основан на одномерной газодинамической модели, включающей все объекты двигателя, связанные с массо- и теплообменом в трубопроводах и т. п. компонентах соответствующих систем двигателя. Помимо моделирования массо- и теплообмена рабочего тела, данный код включает целый ряд других специализированных моделей, необходимых для системного анализа. В настоящей работе код GT-Power использован для исследования элементов вновь создаваемого двигателя, в первую очередь — элементов ТК.

Имитатор рабочего процесса (KIVA-3V + SEMKIN)

При проведении расчетов одновременно моделируются процессы впрыска и горения пилотного топлива в бедной воздушно-метановой смеси при наличии центральной форсунки пилотного топлива. В двигателях подобного типа (т. е. двухтопливных) моделируются процессы в топливных компонентах в различных фазовых состояниях — жидком и газообразном. Поэтому для исследования сложных химических реакций в двухфазной среде был применен трехмерный код KIVA-3V с «химической» подпрограммой CHEMKIN, разработанный в «Sandia National Laboratory». Подпрограмма CHEMKIN II включается в тот момент, когда температура рассматриваемой ячейки станет выше заданной, после чего расчет всех химических реакций ведется в два этапа с помощью подпрограммы SENKIN. Данная подпрограмма кода CHEMKIN моделирует процесс развития во времени химических реакций в однородной среде внутри замкнутой системы. Подпрограмма SENKIN ведет расчет химических реакций методом конечных элементов, и выполняет анализ кинетики горения.

Моделирование стратификации заряда в цилиндре в процессе горения

Работа системы AQM в значительной степени определяется процессом стратификации смеси, состоящей из двух компонентов с различным содержанием кислорода. Смесь на основе NEA направляется в центральную часть цилиндра, а смесь на основе OEA должна распространяться вдоль стенки цилиндрической втулки и оставаться в пристеночном пространстве в течение хода сжатия. Как следует из рис. 5, важнейшим условием стратификации заряда является вихреоб-

разование в цилиндре. Для исследования этого процесса был адаптирован разработанный фирмой AVL трехмерный CFD-код FIRE, хорошо приспособленный для расчета потоков со сложной геометрией на входе в AQM и для генерирования расчетной сетки конечных элементов непосредственно из данных системы САПР для целевого двигателя. Однако полномасштабное моделирование всего процесса стратификации рабочей смеси в 4-клапанном двигателе является слишком сложной задачей. Поэтому применение кода FIRE было ограничено только расчетом формирования смеси внутри камеры сгорания машины быстрого сжатия/расширения (RCEM), использованной для натуральных экспериментов.

**Экспериментальное оборудование
Камера сгорания постоянного объема с расслоенным зарядом (CVCC)**

Главными причинами утечки метана в газовом двигателе считаются гашения пламени вблизи стенки цилиндра и наличие мертвых зон около днища поршня. К сожалению, физическая модель машины типа RCEM, описываемой в следующем разделе, имеет слишком высокий верхний поясок, а верхнее поршневое кольцо расположено гораздо ниже, чтобы обеспечить надежную очистку смотрового окна от масла. Это может привести к ошибке при расчете «вклада» мертвых зон в утечку метана. Поэтому до начала экспериментов на машине RCEM были проведены испытания в камере постоянного объема, которая позволяет полностью устранить мертвые зоны и обеспечить идеальную стратификацию смеси.

Общий вид камеры сгорания постоянного объема (диаметр цилиндра 240 мм, высота 50 мм) показан на рис. 6. Внутри камеры имеется кольцевая разделительная перегородка толщиной 2 мм, внутренний диаметр которой равен 207 мм. Размеры подобраны так, чтобы объем кольцевой камеры снаружи от разделительной перегородки был равен $\frac{1}{4}$ общего объема камеры сгорания, а объем внутреннего цилиндра составлял $\frac{3}{4}$ ее об-

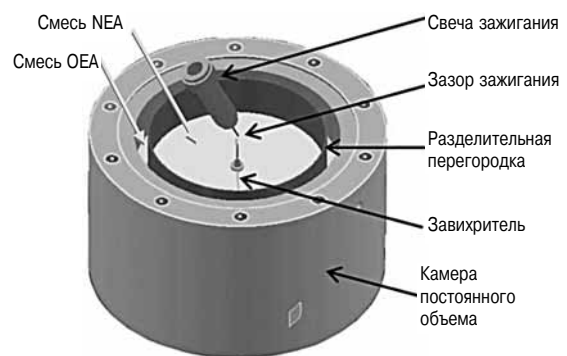


Рис. 6. Камера сгорания постоянного объема с неоднородным зарядом, и с (извлекаемой) тонкой разделительной перегородкой

шего объема. Разделительная перегородка может быть извлечена пневматическим приспособлением немедленно после (раздельного) ввода заряда из смесей на основе NEA и OEA в пространство по обе стороны от разделительной стенки. В отличие от экспериментов на машине RCEM, для воспламенения смеси использовалась центрально расположенная свеча зажигания. После окончания записи процессов изменения давления сгорания и рентгенограмм был выполнен отбор проб газа из цилиндра для проведения анализа на содержание основных компонентов вредных выбросов (CO, CO₂, UHC, NO_x, O₂).

Машина быстрого сжатия/расширения (RCEM)

Общий вид машины RCEM показан на рис. 7, а ее основные характеристик приведены в табл. 1. Машина, которая устанавливается на одноцилиндровый опытный двигатель, предназначена для ви-

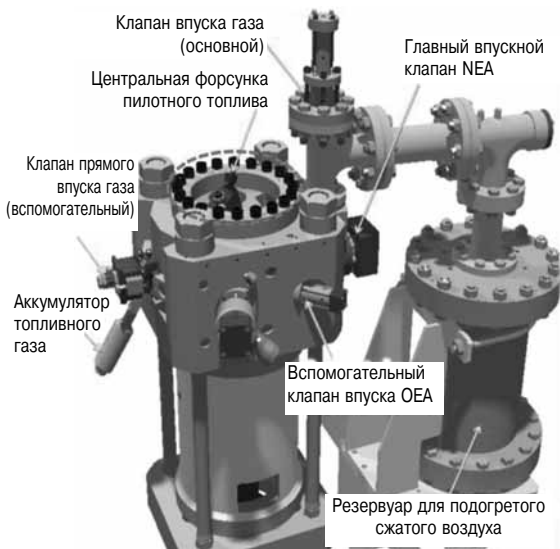


Рис. 7. Общий вид машины RCEM с измерительными приборами

Таблица 1

Машина RCEM – основные технические данные

Базовый двигатель	Одноцилиндровый, 4-тактный
Размерность	Ø240 мм × 260 мм
Длина шатуна	520 мм
Степень сжатия	6,0
Объем зазора	Ø240 мм × h50 мм
Подача основного топлива	Порт подачи метана
Подача пилотного топлива	Прямой впрыск метана и впрыск воздуха через вспомогательный клапан
Пилотное топливо	Газойль (JIS №2)
Устройство зажигания	Центральная форсунка, размеры: Ø0,2 мм × 4 отв.
Скорость двигателя	300 об/мин
Оптическое окно	Плавленый кварц, Ø125 мм × 162 мм

зуализации процессов сгорания. По геометрическим характеристикам она сопоставима с дизелями средней и большой размерности. Машина имеет камеру сгорания с простым плоским профилем, верхний торец которой целиком выполнен из кварцевого стекла, а нижний торец, т. е. днище поршня, имеет совершенно плоскую отполированную до блеска поверхность. Все газовые клапаны и форсунка OEA ориентированы горизонтально и расположены по периферии наружной стенки камеры, как показано на рисунке. Форсунка пилотного топлива для воспламенения воздушно-метановой смеси ориентирована по оси цилиндра. Зеркальная поверхность днища поршня, центральное смотровое окно и оптическая схема обеспечивают возможность наблюдения и записи рабочего процесса в цилиндре с помощью рентгенографии. Хотя кварцевое окно рассчитано на давление сжатия свыше 20 МПа, исследования велись преимущественно при средних нагрузках газового двигателя, так как на этих режимах влияние утечки метана может проявляться сильнее, чем при полной нагрузке.

Чтобы создать условия сжатия, максимально приближенные к реальным газовым двигателям, работающим на бедной смеси, а также обеспечить высоту зазора над поршнем, достаточного для предотвращения прямого попадания струи пилотного топлива на стенку, машина RCEM оборудована воздушным резервуаром, который позволяет отдельно регулировать давление и температуру воздуха перед подачей его в цилиндр. Машина RCEM представляет собой аппарат для одноразового физического моделирования вспышки и процесса расширения. Измерительные приборы рассчитаны на давление сжатия до 12 МПа, и могут выдерживать давление сгорания до 20 МПа.

Результаты исследования

Проверка работоспособности системы AQM
Блок-схема системы AQM в программе GT-Power. На рис. 8 показана блок-схема системы AQM в кодах GT-Power и KIVA-3V, а в табл. 2 приведены ее основные технические данные. На блок-схеме показаны соединения элементов системы AQM и двигателя.

Элементы двигателя, соответствующие GPM, в стандартной библиотеке GT-Power отсутствовали, поэтому их, с некоторым приближением, пришлось создать заново из нескольких библиотечных элементов аналогичного типа.

Так, например, между выходом первичного компрессора (или первичного воздухоохладителя) и входом вторичного компрессора вводилось звено в виде патрубка с двумя отверстиями.

Однако обеспечить высоких значений перепада давления и расхода через мембрану одновременно

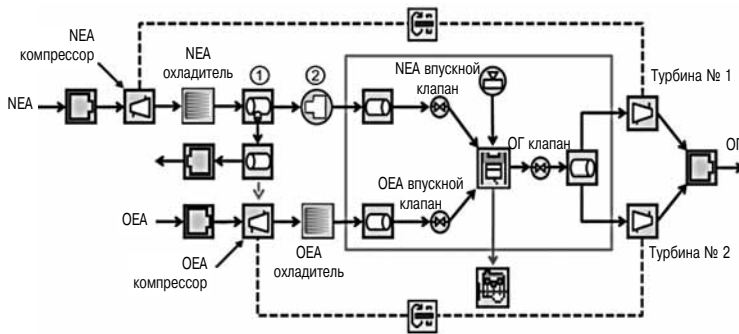


Рис. 8. Схема соединений системы AQM и двигателя в коде GT-Power

Таблица 2

Основные технические характеристики модели двигателя в кодах GT-Power и KIVA-3V

Базовый двигатель	4-тактный, 4-цилиндровый
Размерность	∅200 мм × 300 мм
Длина шатуна	550 мм
Степень сжатия	14,2
Пилотное топливо	Газойль (JIS №2)
Устройство зажигания	Центральная форсунка, 6 отв.
Номинальная мощность	143 кВт
ВМЕР	2 МПа
Скорость двигателя	900 об/мин
Коэффициент избытка воздуха	1,8~2,0

не удалось, так как проходное сечение дроссельного отверстия обратно пропорционально перепаду давления. С другой стороны, площадь поверхности мембраны GPM в действительности гораздо больше, и перепад давления на ней соответственно тоже больше, чем на перфорированной трубке. Учитывая тот факт, что входная сторона мембраны регулярно очищается, и что для более эффективного разделения газовых потоков давление перед ней при помощи дополнительного насоса поддерживается близким к атмосферному, выход первичного компрессора и вход вторичного компрессора были разъединены, как показано на рисунке. Для простоты будем считать, что изначальная смесь NEA поступает на вход первичного (NEA) компрессора, а на вход вторичного (OEA) компрессора поступает смесь OEA. При этом составы смесей могут регулироваться по отдельности.

Проверка КПД ТК с помощью GT-Power. Характеристики обоих ТК системы AQM были адаптированы введением множителей по степени повышения давления и удельному расходу. Чтобы оценить техническую целесообразность системы AQM, были рассчитаны величины КПД ТК, необходимые для нормальной работы системы при условии, что соотношение пропускной способности OEA/NEA и перепада давления на

мембране, измеренные Н. Ohno и др. [4], остается в реальных пределах.

Результаты расчетов представлены в табл. 3 и на рис. 9. Как известно, целесообразность применения того или иного компрессора на двигателе оценивается по его значению КПД. Для нашей цели КПД ТК должен быть не менее 85 %. В крайнем правом столбце для сравнения приведены результаты, полученные для упомянутой выше упрощенной модели AQM, в которой машина GPM представлена в виде патрубка с двумя отверстиями. В AQM для работы GPM требуется гораздо большее давление наддува, чтобы компенсировать потери на дросселирование для получения OEA. Как компрессор, так и турбина должны иметь намного более высокий КПД, чем в обычных двигателях. Уже при массовой доле OEA, равной 30 % система AQM выходит на предел своих возможностей, поскольку КПД компрессора при этом достигает максимума,

Таблица 3

Результаты валидации модели двигателя AQM с помощью GT-Power

Заданная массовая доля OEA, %	0:Баз.	20	25	30	(32,5)
Расход воздуха, г/с	1042	934	978	991	736
ВМЕР, МПа	1,91	2,13	2,14	2,13	2,11
Фактическая массовая доля OEA, %	—	20,8	24,5	28,1	32,6
Давление наддува, МПа	0,258	0,362	0,376	0,380	0,288
ηNEA компрессора, %	55,8	81,6	81,3	81,2	83,4
ηNEA турбины, %	59,2	63,2	62,8	62,8	82,6
ηOEA компрессора, %	—	74,0	77,3	84,3	71,0
ηOEA турбины, %	—	67,9	77,1	81,0	74,4

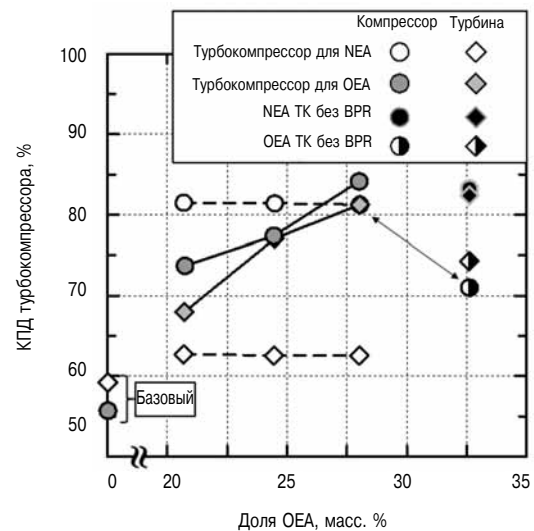


Рис. 9. Значения КПД ТК, необходимые для работы AQM (моделирование в GT-Power)

поэтому с учетом необходимого запаса доля ОЕА должна составлять порядка 25 %. Как мы и опасались, величины давления наддува и КПД ТК, полученные в результате упрощенного моделирования, оказались слишком оптимистичными.

Вспомогательный клапан для подачи ОЕА открывается в начале хода сжатия. Его срабатывание синхронизировано со срабатыванием газовой форсунки для более эффективной стратификации заряда, хотя в реальных двигателях подобная конфигурация вряд ли применима. Для умеренного закручивания потока в цилиндре ось главного впускного клапана несколько смещена в радиальном направлении. Одновременно из вспомогательного клапана поступает сильно закрученная струя, что способствует образованию в цилиндре смеси типа ОЕА. Взаимодействие обоих потоков в динамике предварительно изучалось с помощью скоростемера частиц (PIV — Particle Image Velocimetry).

Влияние системы AQM на рабочий процесс по результатам моделирования

Начальные условия для моделирования в коде KIVA 3-V. В табл. 4 и 5 приведены параметры субмоделей, использованных в коде KIVA-3V, а также необходимые для расчетов технические

Таблица 4

Основные субмодели, используемые в коде KIVA-3V

Выделение NO	Расширенный механизм Зельдовича
Метод PaSR	Модель Kong-Reitz
Решатель ODE	SENKIN в CHEMKIN II
Схема реакции	n-гептан: ERC Diesel, метан: GRI 3.0
Фракционный состав капель	Первичный: метод Blob, Вторичный: модель KH-RT

Таблица 5

Подача основного топлива, впрыск пилотного топлива и условия заряда для моделирования в коде KIVA

Подача основного топлива	
Рабочая смесь	Метан (CH ₄)—воздух
Коэффициента избытка воздуха	1,8
Начальная толщина слоя ОЕА, мм 0 (Баз.)	10 15 20
NEA/OEA, O ₂ %	(21,0) 21,0/ 29,0 21,0/ 27,0 21,0/ 25,0
Впрыск пилотного топлива	
Топливо (прямой впрыск)	n-гептан (газойль)
Диаметр сопловых отверстий	∅ 0,16 мм × 6 отв.
Цикловой впрыск: давление, масса	65 МПа, 0,0268 г
Угол начала и длительность впрыска	10° ПКВ до ВМТ, 7,2° ПКВ
Начало подачи заряда при 70° ПКВ до ВМТ	
Давление и температура	0,804 МПа, 493 К

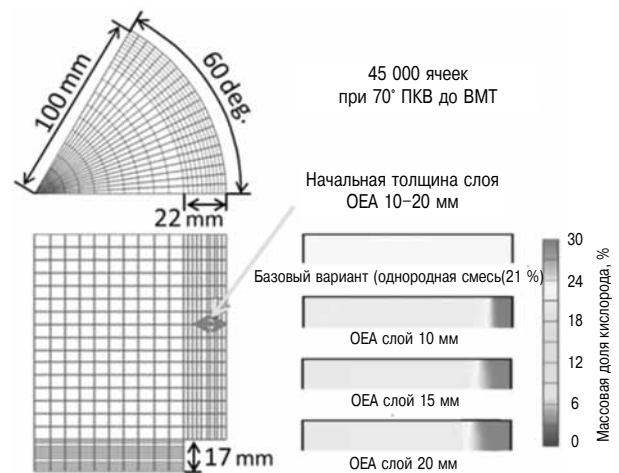


Рис. 10. Разбивка области счета на ячейки и толщина первоначального слоя смеси типа ОЕА

данные двигателя. На рис. 10 показано сечение расчетной области с разбивочной сеткой. Сначала планировалась обычная камера сгорания с неглубокой выемкой в поршне, затем ее форма была упрощена до тороидальной диаметром 108 мм и глубиной 17 мм. Область над верхней крышкой была разбита на особо мелкие ячейки сетки МКЭ для более точного прогнозирования количества несгоревшего метана.

Чтобы более объективно оценить влияние AQM на рабочий процесс, выбрали несколько субмоделей из стандартной библиотеки субмоделей кода KIVA. Однако затем понадобилась еще одна субмодель для имитации распространения пламени в исходной смеси, предназначенная для моделирования процесса развития факела. При использовании стандартных программ скорость распространения пламени была бы слишком мала из-за недооценки теплопроводности тонкого переднего фронта факела. На самом деле теплопередача от «сгоревшей» ячейки сетки МКЭ к «несгоревшей» всегда недостаточна для разогрева последней до такой степени, чтобы поддержать развитие горения. К сожалению, разработка адекватной модели распространения факела оказалась слишком сложной для исполнения за время, отведенное на данный проект. Поэтому в качестве первого расчетного приближения было решено зону NEA вокруг оси цилиндра заменить обычным воздухом с объемным содержанием кислорода 21 %. Что же касается слоя ОЕА вблизи стенки цилиндра, то было проверено три варианта с различной толщиной этого слоя — от 0 (исходный вариант) до 20 мм, чтобы исследовать влияние данного параметра на снижение выброса метана. Содержание кислорода в слое подбиралось таким образом, чтобы общая масса O₂ сохранялась практически постоянной.

За исходную точку расчета принято состояние идеальной стратификации смеси, при котором для всех значений концентрации кислорода коэффициент избытка воздуха остается постоянным. Это означает, что при моделировании проверяется только влияние толщины слоя ОЕА.

Расчетное снижение утечки метана за счет слоя ОЕА. На рис. 11 показана прогнозируемая конфигурация пламени при 10° ПКВ после ВМТ (вверху) и ожидаемая концентрация несгоревшего метана при 80° ПКВ после ВМТ (внизу) в зависимости от толщины слоя ОЕА. При 10° ПКВ после ВМТ фронт пламени доходит до слоя ОЕА толщиной 20 мм, и идет дальше в область схлопывания над днищем поршня, причем до этого момента развитие пламени происходит примерно одинаково при любой толщине слоя. Следовательно, в системе AQM обогащение топливовоздушной смеси кислородом не ускоряет процесс сгорания вблизи стенки цилиндра, как ожидалось. Оказалось, что расчетные кривые тепловыделения имеют пик приблизительно при 13° ПКВ после ВМТ, амплитуда которого возрастает с увеличением толщины слоя ОЕА, хотя концентрация кислорода при этом уменьшалась, чтобы поддерживать тепловыделение постоянным.

Расчетные показатели влияния AQM на характеристики выбросов

Толщина слоя ОЕА, мм	0(Баз.)	10	15	20
Процент O ₂ в NEA % об.	(21,0)	29,0	27,0	25,0
УНС, ppm	1042	609	587	394
Утечка метана, %	1,85	1,10	1,06	0,71
Рост NO _x , %	-	3,0	5,4	12,5

Похоже, что несгоревший метан достаточно долго остается в углах камеры сгорания после окончания основного горения, причем его остается тем меньше, чем толще слой ОЕА. По-видимому, не меньшее значение имеют такие факторы, как объем ОЕА и неравномерность концентрации кислорода.

В табл. 6 приведены расчетные характеристики слоев ОЕА для оценки AQM. Как видно из предыдущего рисунка, стратификация содержания кислорода в камере сгорания оказалась столь эффективной, что при толщине слоя ОЕА 20 мм концентрация несгоревшего метана снизилась более чем на 60 %. В то же время с ростом толщины слоя ОЕА выбросы NO_x монотонно возрастали.

Проверка влияния AQM на рабочий процесс при проведении натуральных испытаний в камере сгорания постоянного объема (CVCC)

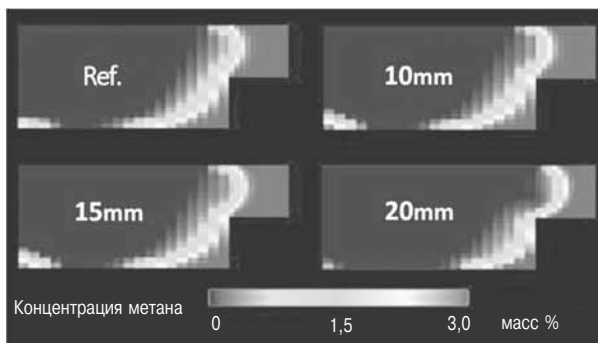
Сравнение выбросов для топливовоздушной смеси различных составов. В табл. 7 приведены параметры неоднородных смесей, подаваемых в CVCC с расслоенным зарядом. Наряду с вариантом заполнения камеры с использованием AQM, проверялись варианты с подачей гомогенной смеси NEA (или ОЕА), после чего разделительная перегородка извлекалась и смесь поджигалась с целью получения исходных данных по выбросам вредных веществ. Количество тепла на входе всегда оставалось постоянным, независимо от состава смеси. Это значит, что в опытах с однородной смесью давление заряда увеличивалось, а содержание кислорода уменьшалось. В опытах с AQM камера внутри разделительной перегородки (при ее наличии) заполнялась смесью на основе NEA, камера за разделительной перегородкой — смесью на основе ОЕА, чтобы поддерживать среднее значение концентрации кислорода на

Таблица 7

Параметры неоднородной смеси в CVCC

Вид смеси	Однородная			Неоднородная	
	Ref.	19 %	25 %	AQM № 1	AQM № 2
Концентрация O ₂ , % об.	21	19	25	NEA 19, OEA 25 (среднее 21)	
Давление, МПа	1,1	1,2	0,93	1,1	
Температура, К	300				

10° ПКВ после ВМТ



80° ПКВ после ВМТ

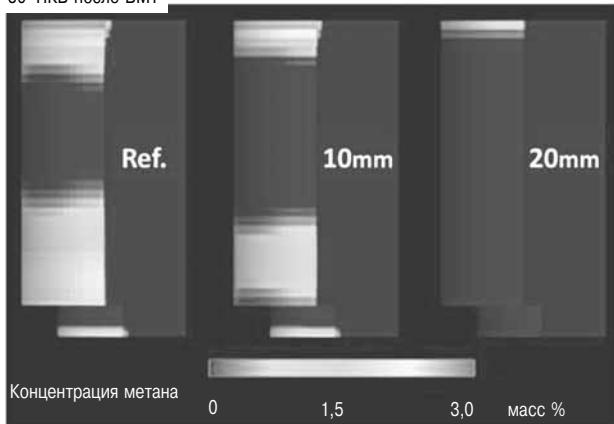


Рис. 11. Расчетное положение факела при различных значениях толщины слоя ОЕА (вверху) и расчетная концентрация метана на стенке камеры после окончания процесса сгорания (внизу)

Таблица 8

Сравнение показателей выбросов при испытаниях разных вариантов неоднородной смеси в CVCC

Вид смеси	Однородная			Неоднородная	
	Ref.	19 %	25 %	AQM № 1	AQM № 2
Подачи метана, моль	0,079	0,082	0,080	0,086	0,082
УНС, ppm	3580	4830	3130	1290	2620
CO ₂ , %	9,15	7,95	11,6	10,2	9,44
CO, ppm	211	166	146	136	141
NO _x , ppm	874	694	1150	718	860

уровне 21 %. В CVCC сгорает смесь искусственного воздуха и чистого метана, воспламеняемая с помощью свечи зажигания, поэтому измеренное количество несгоревших углеводородов УНС — это и есть базовая характеристика утечки метана.

Сравнение состава выбросов для перечисленных вариантов рабочей смеси приведено в табл. 8. Суммарный коэффициент избытка воздуха в CVCC приходилось поддерживать на уровне $\lambda = 1,3$, поскольку энергии свечи зажигания оказалось недостаточно для воспламенения смеси с $\lambda > 2,0$ (которое характерно для реальных газовых двигателей, работающих на обедненной смеси). Кроме того, из-за достаточно сложной процедуры топливоподачи не удалось избежать небольших флуктуаций расхода подаваемого метана. Величины выбросов, зарегистрированных при испытаниях однородных смесей, свидетельствуют о том, что использование ОЕА с содержанием O₂ 25 % несколько уменьшило утечку метана (на 14 %), но в то же время увеличило выбросы NO_x (на 30 %) по сравнению с исходным значением, тогда как действие NEA было прямо противоположным. Стратификация заряда с помощью AQM является результатом обеих названных технологий (ОЕА+NEA), при этом применение AQM оказалось эффективнее, чем ожидалось, в отношении уменьшения утечки метана (примерно на 30 % в случае AQM № 2). Это несколько меньше, чем для другого испытанного варианта мембраны, в сравнении с однородной смесью при содержании кислорода 21 %, причем выбросы NO_x практически остались на том же уровне. Следует, однако, помнить, что в рассмотренных случаях (с AQM) подача метана иногда была больше, чем при испытаниях однородных смесей, и что основным фактором, влияющим на утечку метана, является коэффициент избытка воздуха, особенно в случае сгорания сильно обедненной смеси, использованной в данных испытаниях.

Сравнительная скорость тепловыделения. На рис. 12 показаны характеристики скорости тепло-

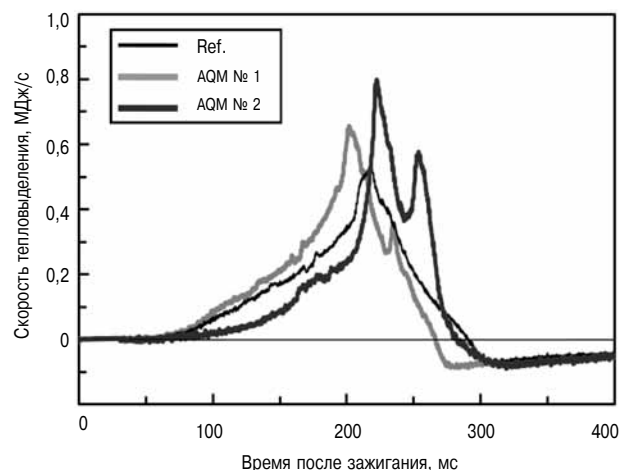


Рис. 12. Скорость тепловыделения при сжигании различных смесей в CVCC с расслоенным зарядом

выделения для исходного варианта (однородная смесь с 21 % кислорода) и для двух вариантов смеси с AQM. При испытаниях AQM № 2 тепловыделение на ранней стадии процесса было меньше, чем в исходном варианте, что, однако, компенсировалось усилением тепловыделения на более поздней стадии благодаря большей концентрации кислорода и более быстрому распространению пламени в слое ОЕА. Вследствие пульсации топливоподачи при испытаниях AQM № 1 результаты испытаний могут трактоваться как несколько неоднозначные. Несмотря на то что результаты испытаний системы AQM выглядят достаточно многообещающими при измерениях в CVCC, необходимо испытать ее в условиях, более приближенных к реальным, чтобы составить представление о ее эффективности как средства снижения утечки метана.

Таблица 9

Условия экспериментов для проверки эффективности AQM на машине RCЕМ

Параметры топливоподачи и сжатия	
Газовое/пilotное топливо	Чистый метан/газойль (JIS № 2)
Впрыск pilotного топлива	Давление: 90 МПа
	Начало впрыска: 7,0° ПКВ до ВМТ
	Длительность впрыска: 5° ПКВ
Конец сжатия	Температура 780 К, давление 8,0 МПа
Параметры рабочей смеси в экспериментах без AQM	
Концентрация O ₂ , % об.	Однородная смесь (19, 21, 25 %)
Коэффициент избытка воздуха: λ_g	1,91~3,15
Параметры рабочей смеси в экспериментах с AQM	
Концентрация O ₂ , % об.	Однородная смесь, O ₂ 21%, $\lambda_g = 2,1$
Концентрация O ₂ , % об. в AQM	O ₂ 19 % + 25 % (среднее 21 %), NEA/OEA $\approx 3,0$

Проверка эффективности AQM при испытаниях в RCEM

Характеристики выбросов при испытаниях однородных смесей. В табл. 9 приведены параметры топливopодачи и состояния рабочей смеси при проверке эффективности AQM в RCEM. Сначала, как и при испытаниях в CVCC, проверялась работа устройства на однородных смесях с различным содержанием кислорода. Это было необходимо для того, чтобы оценить эффект от применения смесей на основе OEA в условиях, более близких к реальным. В испытаниях использовались смеси с теми же значениями концентрации кислорода, что и при испытаниях в CVCC, но коэффициент избытка воздуха при этом менялся в широких пределах — от максимального возможного обеднения смеси почти до границы детонации. Эффективность AQM оценивалась на неоднородных смесях на основе OEA/NEA при их отдельной подаче в машину RCEM.

Значения суммарного коэффициента избытка воздуха для сравнения задавались по границе детонации в исходном (базовом) варианте (т. е. однородная смесь с содержанием кислорода 21 %), и по собственной границе детонации соответственно.

На рис. 13 показано распределение утечки метана в зависимости от коэффициента избытка воздуха в опытах с однородной смесью при различных значениях концентрации кислорода. Из результатов испытаний следует, что по мере повышения степени обогащения смеси и содержания в ней кислорода утечки метана уменьшаются, за исключением резкого скачка утечки на нижней границе диапазона стабильного сгорания, что хорошо заметно на кривой для смеси 19 % O₂. При этом для каждого значения концентрации кислорода зависимость между утечкой метана и коэффициентом избытка воздуха является

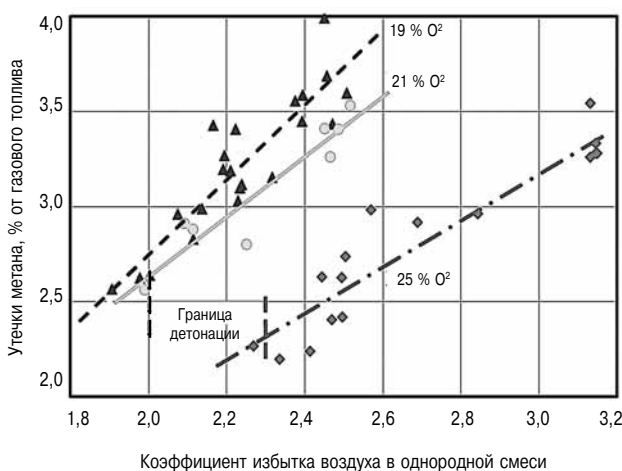


Рис. 13. Влияние содержания O₂ в однородной смеси на утечку метана в RCEM

Показатели выбросов при испытаниях однородных топливных смесей в RCEM

Вид смеси	Однородная ($\lambda_g = 2,48$)		
	Баз. (21 %)	19 %	25 %
Утечка метана, %	3,41	4,09	2,63
CO ₂ , %	4,5	3,9	5,2
CO ppm	477	837	219
NOx, ppm	200	90	1010

ся линейной. Особенно важно отметить, что значение утечки метана в зависимости от обоих параметров носит линейный характер, а не экспоненциальный, как ожидалось перед испытаниями системы AQM.

На рис. 13 пунктиром обозначены границы детонации, которые находятся на уровнях O₂ = 21 % и O₂ = 25 % для $\lambda_g = 2,0$ и $\lambda_g = 2,3$ соответственно. Указанные значения коэффициента избытка воздуха больше, чем в реальных газовых двигателях. Вероятная причина этого — относительно меньшая скорость и относительно большая доля пилотного топлива (5 % от газового топлива в расчете на теплотворную способность) в RCEM по сравнению с газовым двигателем. Также как более высокий уровень выбросов NO_x, отмеченный при испытаниях CVCC, сдвиг границы детонации в сторону более бедной смеси является еще одним недостатком смеси на основе OEA и возможным фактором ограничения применимости AQM.

В табл. 10 показаны результаты измерения выбросов, полученные в экспериментах на RCEM с обедненной рабочей смесью при различных значениях концентрации кислорода, а именно, NEA (O₂ 19 %) базового (O₂ 21 %), и OEA (O₂ 25 %). Концентрация газового топлива для смеси на основе NEA устанавливалась такой, чтобы коэффициент избытка воздуха соответствовал

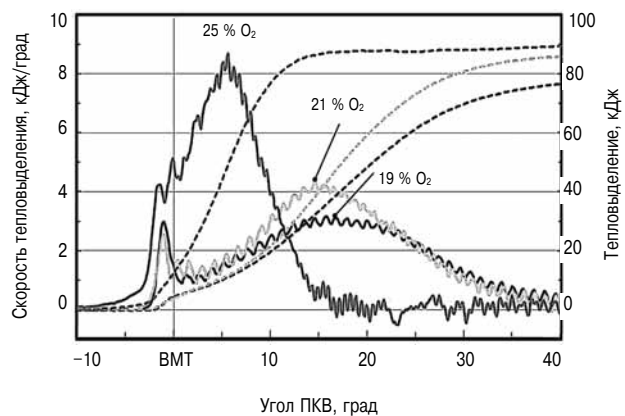


Рис. 14. Влияние содержания O₂ в однородной смеси на процесс тепловыделения в RCEM

максимально возможному обеднению смеси ($\lambda_g = 2,48$). В этом случае также наблюдалась отрицательная и почти линейная корреляция между содержанием кислорода и количеством утечки метана после сгорания, в то время как выбросы NO_x оказались гораздо более чувствительными к условиям сгорания, и их зависимость от концентрации кислорода носила экспоненциальный характер.

Кривые тепловыделения в экспериментах с рабочими смесями, представленными в табл. 10, приведены на рис. 14. Как следует из кривых тепловыделения ROHR (rate of heat release), обогащение смеси кислородом сокращает период задержки воспламенения и намного ускоряет распространение пламени. В то же время обогащение смеси азотом ($\text{O}_2 = 19\%$) на задержку воспламенения практически не влияет, и только слегка ускоряет горение.

Параметры выбросов при использовании AQM. В табл. 11 приведено сравнение параметров выбросов в ходе экспериментов на RCEM со смесью $\text{O}_2 = 21\%$ на границе детонации ($\lambda_g = 2,0$) и с двумя вариантами смеси с AQM при одинаковых значениях коэффициента избытка воздуха ($\lambda_g = 2,0$) и на соответствующих границах детонации ($\lambda_g = 1,8$). Концентрация O_2 в NEA и OEA устанавливалась на уровнях 19 и 25 % соответственно. Соотношение смесей NEA и OEA составляло 3/1, что обеспечивало среднее содержание O_2 на уровне 21 % об. Данные настройки позволяли проверить эффективность AQM в условиях, максимально приближенных к реальным.

При одинаковых значениях коэффициента избытка воздуха эффект AQM в отношении утечки метана был относительно скромным (лишь 10,3 %), а рост выбросов CO обусловлен, по-видимому, присутствием смеси NEA вблизи оси цилиндра. Однако в отношении выбросов NO_x , не наблюдалось сколько-нибудь заметного ухудшения, чего можно было ожидать по результатам испытаний однородной смеси с $\text{O}_2 = 25\%$.

Еще одним полезным эффектом системы AQM оказался сдвиг границы детонации на 10 % в сторону обогащения смеси за счет при-

Таблица 11

Показатели выбросов при испытаниях AQM топливных смесей в RCEM

Вид смеси	Баз. KL	AQM_λ2	AQM KL
Коэффициент избытка воздуха	2,0	←	1,8
УНС, ppm	3190	2930	2455
CO ₂ , %	5,37	5,33	5,86
CO, ppm	1375	1850	1290
NO _x , ppm	1320	1200	1760

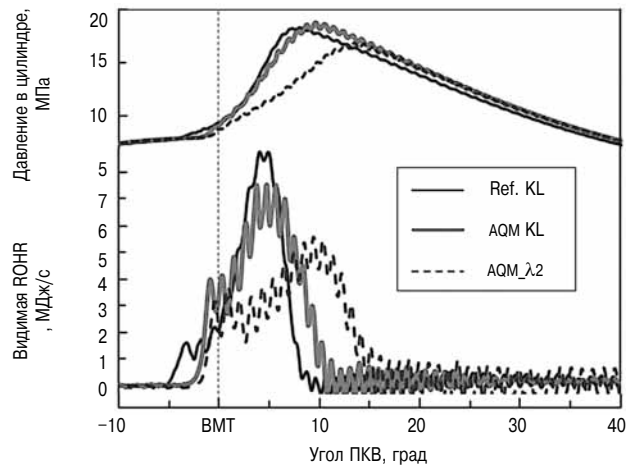


Рис. 15. Влияние AQM вблизи границы детонации (KL) на давление в цилиндре и на скорость тепловыделения в RCEM

сутствия смеси NEA вблизи оси цилиндра. При сравнении с базовым вариантом границы детонации (KL), применение AQM позволило снизить утечки метана на 30 %, тогда как выбросы CO не изменились, а выбросы NO_x возросли на 30 %.

На рис. 15 приведены характеристики рабочего процесса и ROHR, соответствующие неоднородным смесям, указанным в табл. 11. Поскольку обогащение смеси в этом случае гораздо выше, чем в предыдущем, то вторая кривая (ROHR) указывает на более высокое значение пика тепловыделения и гораздо более раннее сгорание для всех вариантов смеси, а также меньшую задержку воспламенения даже для неоднородной смеси (исходный вариант).

Высокочастотные пульсации давления в цилиндре наблюдались как при однородной, так и при неоднородной смесях (в обоих случаях — со своей границей детонации). На ранней стадии сгорания неоднородные смеси характеризуются большей задержкой воспламенения, как и однородные смеси. При этом реакция сгорания становится более управляемой с ускорением поздней

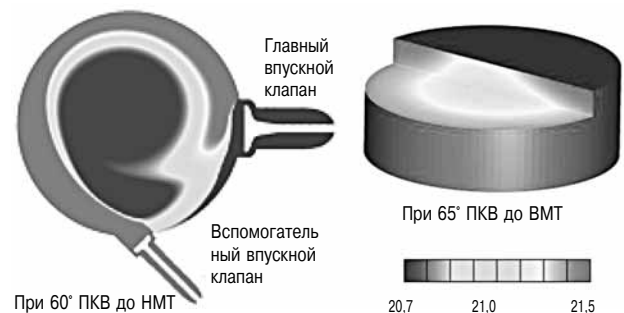


Рис. 16. Расчетный процесс распределения кислорода на цикл всасывания и в конце цикла в RCEM (моделирование в коде FIRE)

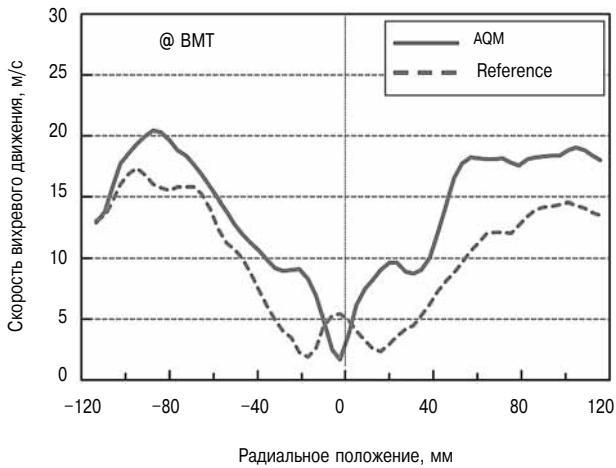


Рис. 17. Профиль скорости завихрения потока в RCEM, полученный методом PIV

стадии сгорания благодаря наличию слоя ОЕА. Подводя итоги, можно сказать, что полученные результаты отчасти подтверждают возможность стратификации заряда в цилиндре RCEM, которая, вопреки ожиданиям, оказалась недостаточной для предотвращения утечки метана.

Моделирование стратификации. На рис. 16 показаны результаты моделирования стратификации смеси в опытах с AQM на машине RCEM с помощью кода FIRE. Видно, как на такте всасывания с помощью тангенциально-ориентированного вспомогательного впускного клапана формируется слой ОЕА, прилегающий к стенке цилиндра, однако картина стратификации оказывается заметно смазанной как в радиальном, так и в тангенциальном направлениях, когда поршень на такте сжатия начинает движение вверх. Диапазон распределения кислорода сжимается до величины менее 1 % об.

На рис. 17 показаны профили скорости вихреобразования, полученные с помощью прибора для динамического измерения PIV. Штриховая линия соответствует нормальной работе только с главным впускным клапаном (базовый вариант), а сплошная линия — работе в режиме AQM с включенным вспомогательным впускным клапаном. Как было показано, стратификация распределения кислорода трудно достижима даже в машине RCEM со вспомогательным впускным клапаном, но усиление вихре-

образования в целом обеспечивалось за счет дополнительного выпуска ОЕА через периферийный порт, поэтому при использовании AQM показатели рабочего процесса должны улучшаться.

Визуализация рентгеновского изображения распространения пламени в RCEM. На рис. 18 показана картина распространения пламени в RCEM, полученная методом PIV, при экспериментах с неоднородной смесью с параметрами, приведенными в табл. 10 и на рис. 14, имеют вид цветных пятен на черном фоне. Поле кругового обзора охватывает все сечение камеры сгорания RCEM, что позволяет видеть одну из четырех струй пилотного топлива и распространение пламени вокруг струи. Завихрения направлены по часовой стрелке.

Как и следовало ожидать, с учетом характера кривых тепловыделения (рис. 14), форма и площадь зон горения, соответствующих вариантам $O_2 = 19\%$ и $O_2 = 21\%$, примерно одинаковы, однако последнем случае ядро выбивающегося из струи пламени несколько светлее, чем в предыдущем. Хотя тепловыделение вблизи ВМТ при $O_2 = 25\%$ является максимальным из трех рассматриваемых вариантов, пламя на фото в этом случае не сильно отличается от остальных, и не

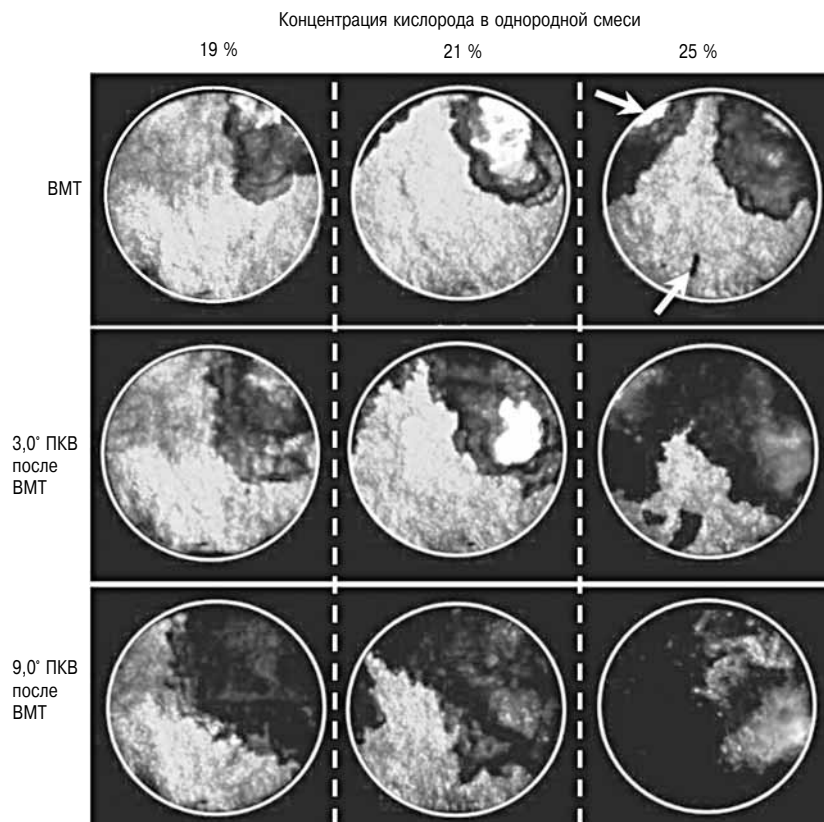


Рис. 18. Изображения процесса распространения пламени в RCEM с однородными смесями с различным содержанием O_2 ($\lambda_g = 2,48$)

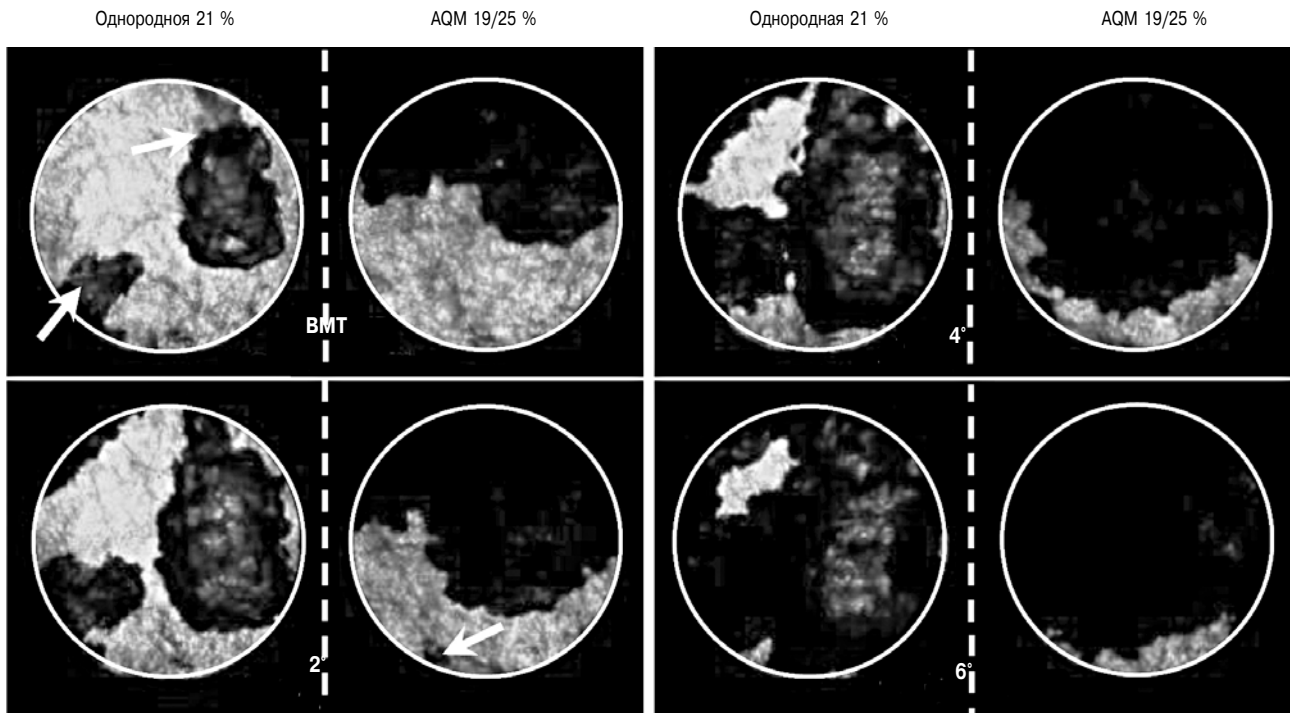


Рис. 19. Изображения процесса распространения пламени в RCEM с однородной смесью и AQM стратифицированной смесью ($\lambda_g = 2,1$)

имеет светлого ядра. Возможно, это является случайностью, и может быть результатом более быстрого роста соседнего топливного факела со светлым ядром и дополнительного распространения пламени от самовоспламенившихся выступов («протуберанцев»). Об этом нередко упоминается в литературе [8], особенно когда речь идет о состоянии смеси, близком к границе детонации, как в случае $O_2 = 25 \%$.

Суммируя полученные результаты, можно отметить, что в двигателях с открытой камерой, работающих на обедненной смеси, которая зажигается струей пилотного топлива, процесс распространения пламени сильно отличается от обычных двигателей с искровым зажиганием. В данном случае воспламенение смеси инициируется струями пилотного топлива и окружающими их образованиями, после чего пламя движется в сторону стенки цилиндра, а также проникает в зазор между двумя соседними струями.

На рис. 19 показана сравнительная картина распространения пламени в RCEM при работе на однородной и неоднородной (в случае AQM) смесях. Из соображений безопасности при проведении экспериментов по визуализации процесса коэффициент избытка воздуха был слегка увеличен (до $\lambda_g = 2,1$ вместо 2,0), что соответствовало границе детонации для однородной смеси $O_2 = 21 \%$, упомянутой в табл. 11 и на рис. 15.

Предполагалось, что это небольшое изменение плотности топлива уменьшит скорость распространения пламени и существенно отодвинет границу детонации. На деле оказалось, что область сгорания даже увеличилась по сравнению с более бедной смесью ($\lambda_g = 2,48$) при тех же значениях концентрации кислорода ($O_2 = 21 \%$) и угла ПКВ.

При горении однородной смеси граница между диффузным пламенем струи и пламенем горячей газовой смеси была зафиксирована в момент прохождения ВМТ. После ВМТ пламя горячей газовой смеси накрыло всю поверхность и распространилось в радиальном и периферическом направлениях. Самовоспламеняющиеся выступы наблюдались даже в случае $O_2 = 21 \%$, поскольку более высокое содержание топлива в смеси вызвало значительное увеличение тепловыделения.

На фотографиях отчетливо виден эффект системы AQM. Во-первых, процесс зажигания смеси струями пилотного топлива резко активизировался, при этом несгоревшего топлива между соседними струями почти не оставалось. В результате распространение пламени носило практически осесимметричный характер. Главную роль здесь должно быть, сыграло усиление вихреобразования и турбулентности смеси в цилиндре.

Во-вторых, считалось, что возникновение и рост самовоспламеняющихся выступов будут протекать более интенсивно, чем в однородной

смеси, благодаря наличию слоя смеси на основе ОЕА, но эти ожидания не оправдались. Выступы появлялись, как видно из снимка, при 2° ПКВ после ВМТ, но не росли благодаря увеличению скорости и завихрений потока вблизи стенки цилиндра. Эти наблюдения свидетельствуют о том, что для систем AQM ключевыми факторами являются генерация и контроль вихреобразования.

Заключение

В ходе проведения настоящей работы впервые был предложен реальный метод предотвращения выбросов несгоревшего метана из газовых двигателей большой мощности, работающих на природном газе. Данная технология, получившая название антигасящей мембраны (AQМ), основана на применении газопроницаемой мембраны (GPM), которая устанавливается между газовым двигателем и компрессором системы наддува, и разделяет сжатый воздух на две фракции — воздух, обогащенный кислородом (ОЕА), и воздух, обогащенный азотом (NEA). Смесь на основе ОЕА снижает недогорание метана за счет сокращения дистанции гашения пламени, когда факел пламени ориентирован в направлении стенки цилиндра, а смесь на основе NEA, подаваемая в центральную часть цилиндра, снижает вероятность детонации.

Работоспособность системы AQM и возможный эффект от ее применения были оценены с помощью математического моделирования, а также физического моделирования с использованием уникальной аппаратуры. Эта оценка привела авторов к следующим заключениям.

➤ Система AQM представляет собой систему виртуального двигателя, состоящего из одного (главного) турбокомпрессора (ТК) для NEA, второго (вспомогательного) ТК для ОЕА, и полностью независимых (отдельных) портов подачи ОЕА/NEA и GPM.

➤ Работоспособность системы AQM была успешно подтверждена с помощью одномерной

модели рабочего процесса. Однако массовая доля ОЕА, как оказалось, не может превышать 30 % воздушного потока на входе в цилиндр, поскольку работа сжатия при этом сильно возрастает, что потребует применения турбокомпрессора с нереально высоким КПД.

➤ Влияние AQM на снижение выбросов несгоревшего метана и рост выбросов NO были подтверждены трехмерным CFD-моделированием на основе подробного анализа химических реакций, однако расчетное снижение выбросов метана на 60 % оказалось завышенным из-за допущения об идеальной стратификации смеси, а также из-за отсутствия адекватной модели распространения пламени.

➤ Опыты с AQM, которые проводились при идеальной стратификации смеси, с использованием камеры сгорания постоянного объема с разделяемым зарядом, доказали возможность снижения выбросов метана не менее чем на 30 % без существенного увеличения выбросов NO_x.

➤ Опыты с AQM в условиях, приближенных к реальным, проводились на машине быстрого сжатия/расширения. Они показали, что выброс метана уменьшился на 10 % при том же значении коэффициента избытка воздуха, а обогащение смеси на 10 % привело к снижению выбросов метана на 30 % при одновременном росте выбросов NO_x также на 30 %.

➤ Трехмерное CFD-моделирование рабочего процесса показало, что стратификация содержания кислорода вблизи ВМТ трудноосуществима, хотя в начале цикла сжатия стратификация заряда практически идеальна.

➤ Картина распределения вихрей в цилиндре и визуализация распространения пламени в машине быстрого сжатия/расширения показали, что возможность управления потоками в цилиндре столь же важна, как и стратификация содержания кислорода в системе AQM.

Литература

1. Melhus O., Garasen I. Haukebo B. et al. «NO_x Emission Reduction by Use of N₂ Diluted Charge Air», Proc. of CIMAC (Bergen), № 218 (2010).
2. Lewis B., Von Elbe G. Combustion Flames and Explosions of Gases, 3rd edition, 268 p., ACADEMIC PRESS, INC..
3. Kondo S. et al. Effect of Pressure and Oxygen Concentration on Quenching Distances Flammable Gases, Nippon Kagaku Kaishi (in Japanese), 7 (1992). — P. 788–792.
4. Ohno H. Development of a Nitrogen-enrichment/Humidification Membrane System For NO_x Emission reduction For Marine Diesel Engines, ISME KOBE, C6-3 (2011).

5. Higashida M., Nakamura T., Onishi I. et al. Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NO_x Regulation Tier 3 for Two-Stroke Diesel Engine, Proc. of CIMAC (Shanghai), № 219 (2013).
6. Pascal C., Schmit S., Eilts P. Strategies for switching between ECA and nonECA operation for a medium-speed diesel engine with EGR, Proc. of CIMAC (Shanghai), № 232 (2013).
7. Gamma Technologies Inc. A Gt-Suitetm Application for Engine Performance, Acoustics, and Control Simulation, GT-Power User's Manual Halstead, (2006).
8. Tajima H., Kunimitsu M., Sugiura K., Tsuru D., Development of High-efficiency Gas Engine through Observation and Simulation of Knocking Phenomena, Proc. of CIMAC (Bergen), № 213 (2010).

ОСОБЕННОСТИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГАЗОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПИТАНИИ ПРИРОДНЫМ ГАЗОМ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА

Satoshi Kawauchi, National Maritime Research Institute
Benjamin Korb, Georg Wachtmeister,
Technical University of Munich
Daisuke Tsuru, Koji Takasaki, Kyushu University
Junichi Hirata, ClassNK

Введение

В настоящее время в Германии одной из основных тенденций в области развития энергетики является переход на возобновляемую энергию, доля которой в энергетическом балансе страны растет из года в год (рис. 1 [1]). К 2015 г. эта доля достигла 30 % и продолжает расти. Использование возобновляемой энергии способствует сокращению выбросов CO₂, однако ее доступность зависит от климата и других внешних условий. Поэтому для увеличения доли возобновляемой энергии необходимо преодолевать определенные трудности. Одним из возможных решений может стать конвертация электроэнергии в газ («Power to Gas») [2]. Излишки энергии, образующиеся в периоды пониженного потребления, могут использоваться для производства водорода, который может применяться в качестве топлива для ДВС и топливных ячеек, или как компонент сырья для синтетических материалов. Возможность закачки H₂ в газораспределительные сети весьма привлекательна во многих отношениях. Например, газораспределительная сеть с большим территориальным покрытием является хорошим средством транспортировки и хранения газа. С другой стороны, по ряду свойств H₂ заметно отличается от природного газа, и это различие может сказываться на конечных потребителях как позитивным, так и негативным образом. Поэтому последствия закачки H₂ в сети природного газа должны быть проанализированы с учетом всех возможных вариантов. Предметом настоящего исследования является влияние добавки H₂ к природному газу на рабочий процесс двигателя.

Известен ряд работ, посвященных этой теме, в которых подробно изучался рабочий процесс двигателя, его показатели, а также параметры вредных выбросов. Однако эти работы в большинстве своем относятся к высокооборотным малоразмерным двигателям автомобильного класса, и лишь в немногих из них рассматривались стационарные или судовые двигатели большой мощности. В двигателях с большими размерами цилиндра влияние добавки H₂ к топливу на условия сгорания и рабочие параметры двигателя может быть существенно различным.

Поэтому настоящая работа посвящена исключительно стационарным и судовым двигателям большой мощности. В первой части доклада

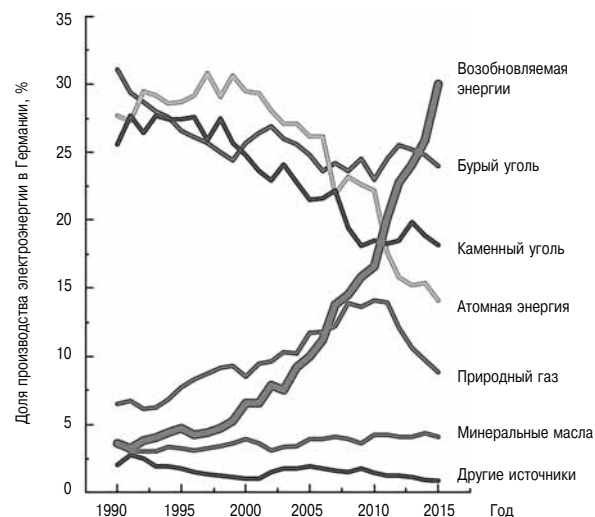


Рис. 1. Производство электроэнергии в Германии: распределение по видам используемого топлива [1]

изложены некоторые результаты предыдущих исследований [3, 4], в том числе особенности рабочего процесса и показатели вредных выбросов, полученные в результате стендовых испытаний, выполненных на опытном отсеке газового двигателя (SCE — single cylinder research gas engine). Во второй части представлены результаты оптических исследований рабочего процесса, выполненных на машине быстрого сжатия/расширения (RCEM). В общем случае, индикаторная диаграмма двигателя не дает представления о конструктивных параметрах его камеры сгорания. Поэтому оптическое индицирование и визуализация могут оказаться весьма полезным для лучшего понимания особенностей рабочего процесса.

Стендовые испытания.

Условия испытаний и оборудование экспериментального стенда

Стендовые испытания проводились на установке SCE в Институте двигателей внутреннего сгорания Технического Университета Мюнхена (TUM). Основные параметры установки приведены в табл. 1, а ее общий вид — на рис. 2. В качестве устройства зажигания газовой смеси используется закрытая форкамера. Зажигание инициируется факелом, вытекающим из форкамеры, в которой воспламеняется пилотное топливо. Программа и методика испытаний, включая сбор данных, проведение измерений, анализ результатов и т. д., подробно описаны в [4]. В испытаниях использовался природный газ (NG) из городской сети Мюнхена. Состав газа приведен в табл. 2. Исследовались два варианта топлива — с содержанием H₂ 10 и 30 моль-% (далее обозначаемые соответственно как HNG10 и HNG30). Коэффициент избытка воздуха рассчитывался по методу Бретшнайдера (Brettschneider).

Таблица 1

Двигатель SCE — основные технические данные

Тип	1-цилиндровый, 4-тактный
Диаметр цилиндра, мм	170
Ход поршня, мм	210
Степень сжатия	12,7
Скорость двигателя, об/мин	1500

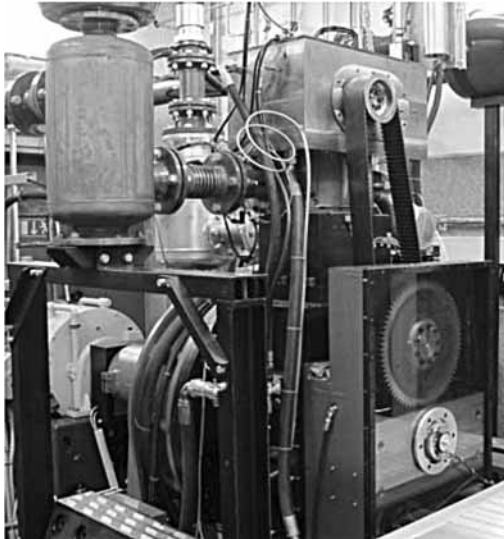


Рис. 2. Общий вид машины SCE

Таблица 2

Состав газа [4]

Компонент	NG	HNG10	HNG30
CH ₄ , моль-%	95,01	85,8	66,4
C ₂ H ₆ моль-%	3,24	2,65	2,23
C ₃ H ₈ моль-%	0,33	0,28	0,22
Longchain HCs моль-%	0,15	0,12	0,11
N ₂ моль-%	0,53	0,49	0,36
CO ₂ моль-%	0,75	0,59	0,51
H ₂ моль-%	0	10,1	30,2

Результаты работы.

Диапазон рабочих режимов двигателя

Принимая во внимание нормативы вредных выбросов от стационарных газовых двигателей, для оценки диапазона рабочих режимов была использована диаграмма, отражающая зависимость выбросов NO_x от положения центра сгорания (CoC — Center of Combustion) и коэффициента избытка воздуха (λ). Диаграмма была построена с помощью интерполяции точек измерения в координатах CoC– λ . Результаты работы двигателя на NG и HNG30 представлены на рис. 3, где наглядно показано, как положение CoC и λ влияют на выбросы NO_x. При работе на чистом природном газе среднее эффективное давление IMEP на границе детонации изменялось в

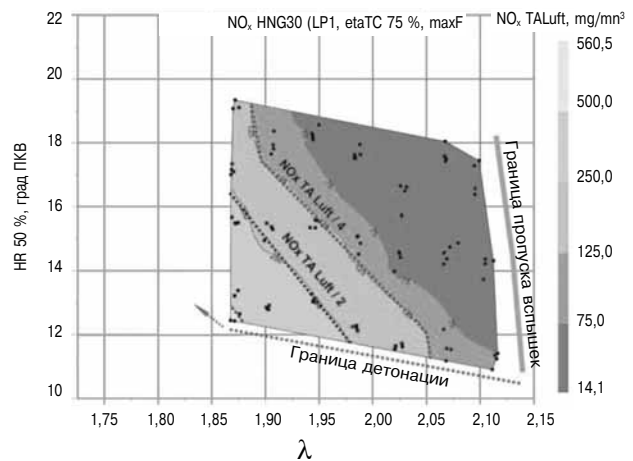
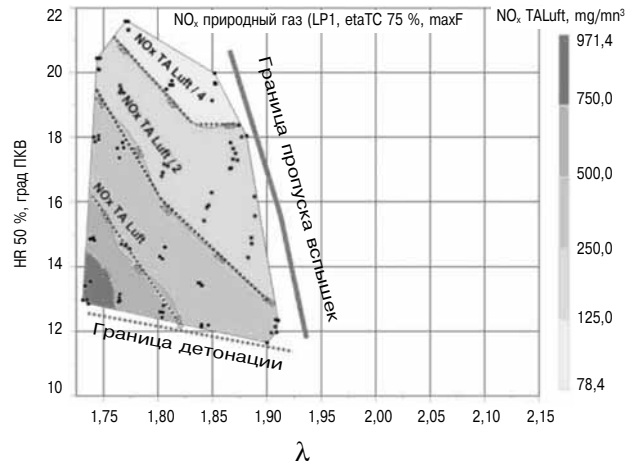


Рис. 3. Поле режимов работы двигателя для NG и HNG30

пределах от 20 до 18,4 бар, а при работе на HNG30 — в пределах от 19,4 до 17,5 бар. Указанное различие в IMEP на положение границы детонации влияет незначительно, поэтому прямое сравнение рабочих диапазонов представляется правомерным. При добавке 30 % H₂ граница пропуска вспышек отодвинулась с $\lambda = 1,9$ до $\lambda = 2,1$, что объясняется лучшим горением смеси с добавкой H₂. Сдвиг границы пропуска вспышек позволил увеличить зону рабочих режимов на обедненной смеси с низкими выбросами (менее 250 мг/Нм³), что составляет половину от предельно допустимых выбросов по TA Luft [5]. Это позволило сдвинуть CoC в направлении ВМТ, что дает возможность одновременно повысить КПД и снизить выбросы NO_x. Сопоставление границ детонации при $\lambda = 1,9$ показывает, что добавка к топливу 30 % H₂ привела к сдвигу положения CoC с 11,7 до 12,3 град ПКВ после ВМТ. Сдвиг небольшой, учитывая, что метановое число природного газа при добавлении 30 % H₂ заметно снижается. Однако качество работы двигателя при $\lambda = 2,1$, что соответствует границе пропуска вспышек для HNG30, позволило и дальше сдвигать CoC по сравнению с базовым двигателем (работающем на чистом природном газе). Получен-

ный результат свидетельствует о том, что работа на обедненной смеси может улучшить антидетонационные свойства топлив с добавкой H_2 . Несмотря на то что добавка 30 % H_2 несущественно влияет на положение границы детонации, существует опасность преждевременного воспламенения топлива, что определяется быстрым ростом давления еще до срабатывания свечи зажигания, в результате чего сужается поле допустимых режимов. При добавке 10 % H_2 преждевременное воспламенение топлива также имеет место, хотя коэффициент избытка воздуха был больше, чем в случае с HNG30. Анализ причин этого явления, а также результаты оптических исследований будут приведены в следующем разделе.

Рабочие параметры двигателя и характеристики вредных выбросов

Рабочие параметры двигателя и характеристики вредных выбросов регистрировались при постоянном положении CoC, чтобы можно было сравнивать данные, полученные при использовании различных видов топлива. Было выбрано положение CoC при 13° после ВМТ. Соответствующие данные были получены интерполяцией между точками диаграммы на рис. 3, где по оси X отложена величина λ , по оси Y — положение CoC, а по оси Z — интересующие нас параметры рабочего процесса.

Величины задержки воспламенения и длительности горения показаны на рис. 4 и 5. Задержка воспламенения определялась как период между разрядом на свече зажигания и моментом выгорания 5 % топлива (по массе), а длительность горения определялась как период между моментами выгорания 10 и 90 % топлива (по массе). Увеличение концентрации H_2 в топливе вело к

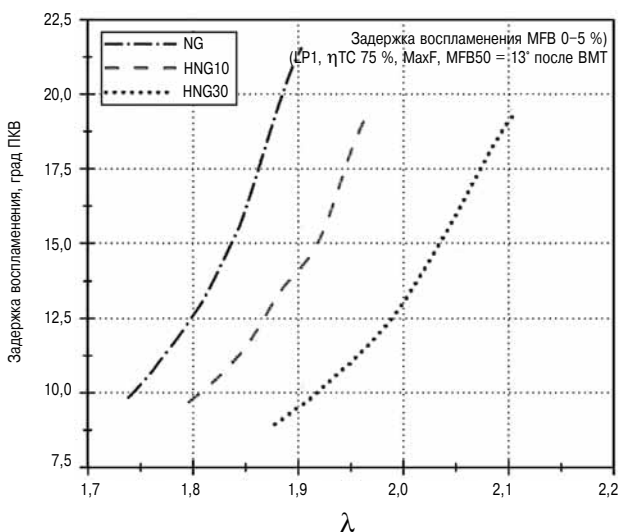


Рис. 4. Зависимость задержки воспламенения от λ для NG, HNG10 и HNG30

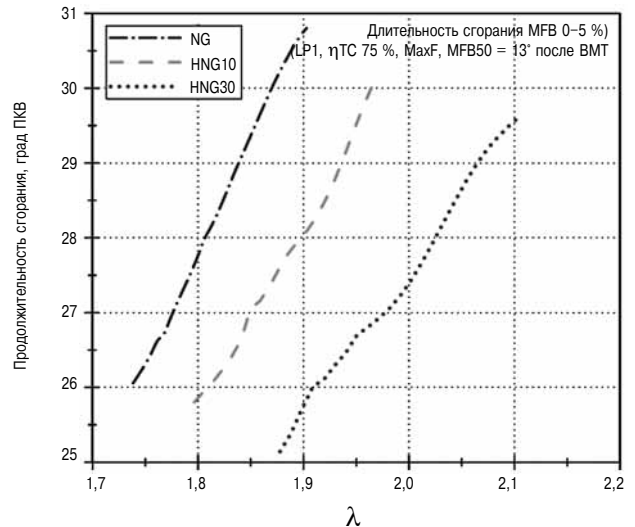


Рис. 5. Зависимость продолжительности сгорания от λ для NG, HNG10 и HNG30

сокращению обоих указанных параметров. При содержании H_2 в топливе 10 % задержка воспламенения уменьшилась почти на 7° ПКВ, а длительность горения — на 3° ПКВ при $\lambda = 1,9$. Таким образом, добавка H_2 к топливу оказывает значительное влияние на период задержки воспламенения.

Результаты эксперимента с изменением IMEP (COV_{IMEP})* показаны на рис. 6. Они свидетельствуют о том, что увеличение содержания H_2 ведет к снижению величины COV_{IMEP} . Очевидно также, что добавка H_2 к топливу при работе на более бедной смеси уменьшает разброс параметров между циклами и отодвигает границу пропусков вспышек.

Результаты измерения выбросов NO_x показаны на рис. 7. При равном значении коэффициента

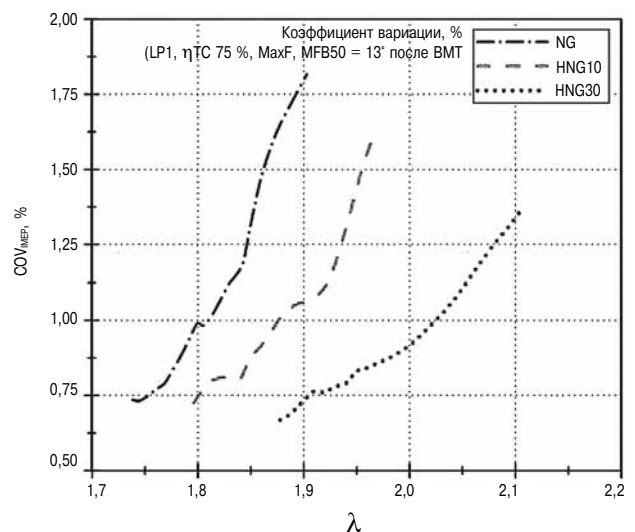


Рис. 6. Зависимость COV_{IMEP} (коэффициента вариаций среднего эффективного давления, %) от λ для NG, HNG10 и HNG30

* COV_{IMEP} — коэффициент вариаций среднего эффективного давления, %

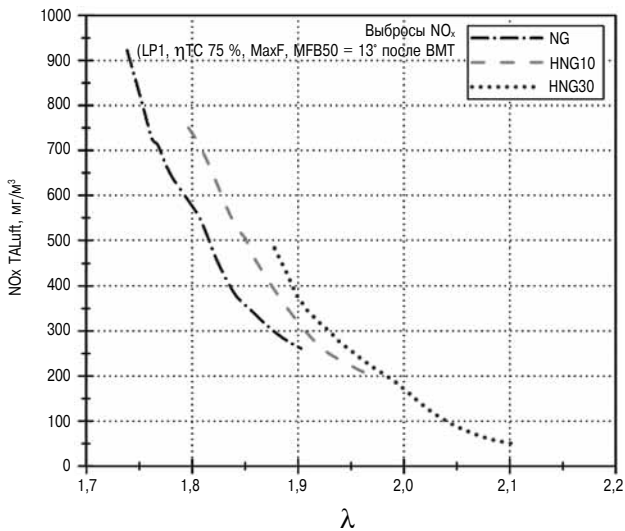


Рис. 7. Зависимость выбросов NO_x от λ для NG, HNG10 и HNG30

избытка воздуха выбросы NO_x с увеличением содержания H₂ несколько возрастают. Причиной этого являются ускорение тепловыделения и рост температуры сгорания, вызванной присутствием H₂ в топливе. С другой стороны, сдвиг границы пропускания всплесков в большую сторону позволяет снизить выбросы NO_x до минимума. При добавлении 30 % H₂ выбросы NO_x при λ = 2,1 составляют порядка 50 мг/м³, т. е. десятую часть предельно допустимого значения по TA Luft. Следовательно, рост концентрации NO_x в отработавших газах может быть компенсирован расширением диапазона работы на обедненной смеси, что приводит к снижению общего количества выбросов NO_x.

Результаты измерений несгоревших углеводородов показаны на рис. 8. При работе двигателя на всех трех видах топлива выбросы THC по мере обеднения смеси росли. Во всех случаях уровень выбросов THC на границе пропускания всплесков был одинаков, тогда как топлива с более высоким содержанием H₂ показали снижение выбросов NO_x. Это означает, что добавка H₂ к топливу облегчит достижение оптимального компромисса между выбросами NO_x и THC. При λ = 1,9 добавление 10 % H₂ позволило снизить выбросы THC на 26 %, а при добавлении 30 % H₂ выбросы THC снизились на 44 %. В целом снижение выбросов THC является результатом улучшения качества рабочего процесса. Однако необходимо принять во внимание, что добавка H₂ уменьшает содержание атомов углерода в топливе. Расчет, основанный на общем уравнении сгорания бинарных смесей типа H₂-CH₄, позволяет численно оценить влияние этого эффекта на снижение выбросов THC. Согласно этому расчету добавление 10 % H₂ уменьшает выбросы THC на 3 %, а

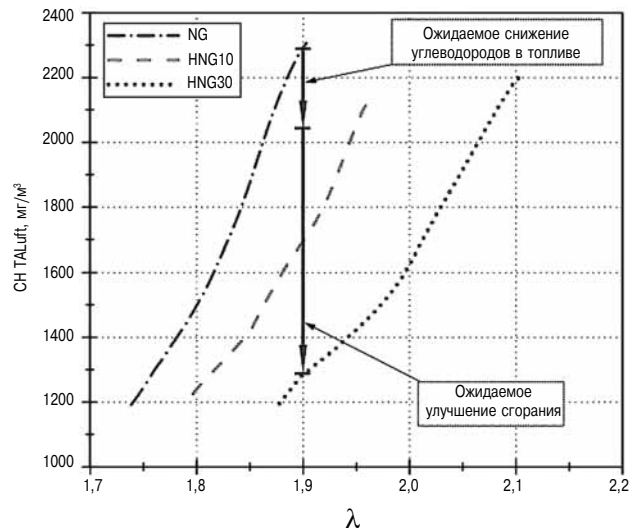


Рис. 8. Зависимость выбросов CH от λ для NG, HNG10 и HNG30

добавление 30 % H₂ — на 10 %. Отсюда можно сделать вывод, что снижение выбросов THC обусловлено, главным образом, совершенствованием рабочего процесса.

На рис. 9 показана зависимость индикаторного КПД (η_i) от λ.

Для каждого вида топлива увеличение коэффициента избытка воздуха приводило к снижению η_i, в то время как увеличение концентрации H₂ в топливе приводило к росту КПД. Сравнение КПД при равном уровне выбросов NO_x показало, что добавка 30 % H₂ обеспечивает рост КПД двигателя с 44,9 % (на чистом природном газе) до 45,7 %.

Таким образом, добавление H₂ к топливу может облегчить достижение оптимального компромисса между выбросами NO_x и η_i.

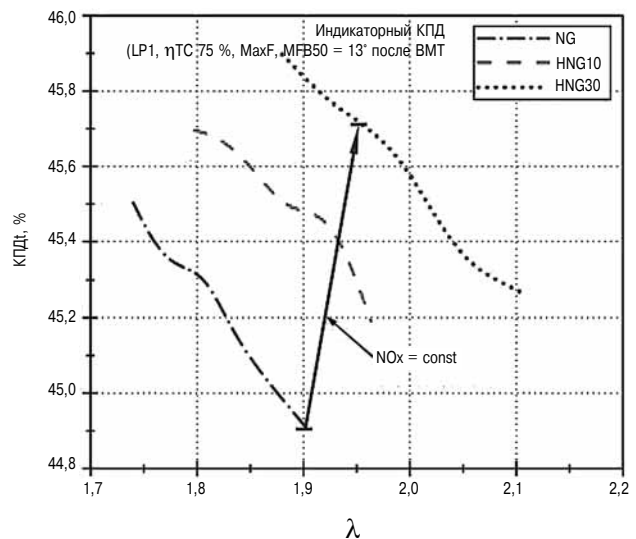


Рис. 9. Зависимость КПД от λ для NG, HNG10 и HNG30

Оптическое исследование.

Условия испытаний и оборудование экспериментального стенда

Оптическое исследование проводилось на машине RCEM лаборатории двигателей Университета Кюсю. Основные технические характеристики машины RCEM приведены в табл. 3, а ее общий вид — на рис. 10. Подробно принцип работы машины RCEM и методика эксперимента описаны в [6]. В настоящем исследовании метод лазерной рентгенографии был использован для наблюдения за процессом в цилиндре двигателя, работающего на обедненной смеси. Оптическая схема наблюдения снизу камеры была разработана специально для экспериментов с добавкой H_2 . Пучок параллельных лучей, проходящих через прозрачное окно, отражался от полированной зеркальной поверхности поршня. Область наблюдения в камере сгорания показана на рис. 11. Окно из оптического стекла диаметром 104 мм установлено на расстоянии 68 мм от центра поршня. На снимках можно видеть две из шести струй топлива, вытекающих из сопла форсунки. Технические характеристики прибора и оптической схемы приведены в табл. 4.

Условия эксперимента сведены в табл. 5. Предметом настоящего исследования является рабочий процесс в двухтопливном двигателе. Для распыливания топлива используется форсунка с шестью сопловыми отверстиями диаметром

Таблица 3

Машина RCEM: основные технические данные

Диаметр цилиндра, мм	240
Ход поршня, мм	260
Степень сжатия	9,12
Частота вращения, об/мин	360

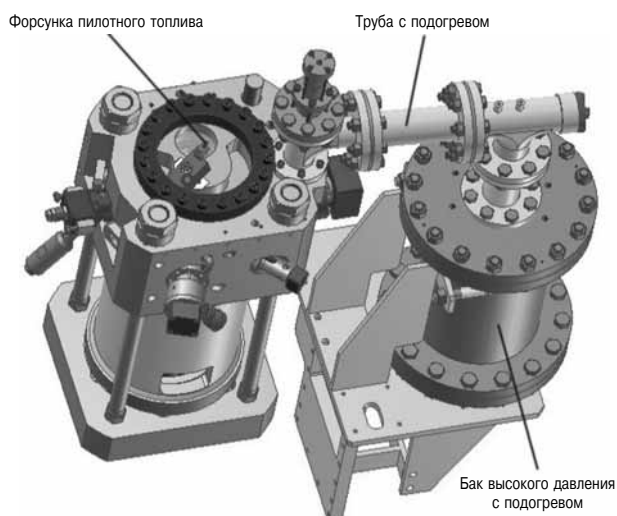


Рис. 10. Установка RCEM

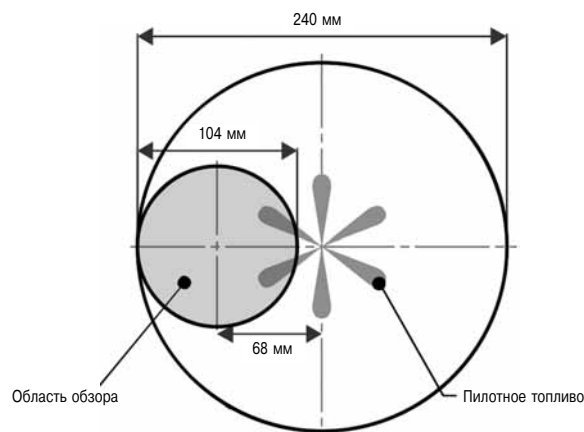


Рис. 11. Схема области наблюдения

Таблица 4

Параметры оптики и фотосъемки при исследовании рабочего процесса

Скоростная камера	Phantom V1610
Частота кадров	40 000 fps
Разрешение:	512×512
Апертура	2,8
Выдержка	1 мс
Объектив	Объектив Nikon с переменным фокусным расстоянием и телеконвертером Kenko Tokina

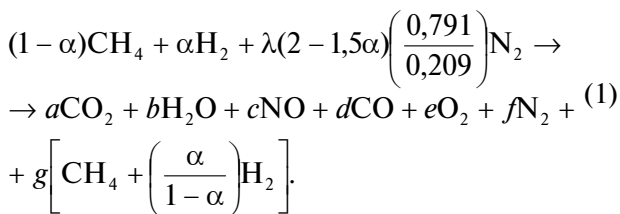
Таблица 5

Условия эксперимента

Газовое топливо	Бинарная смесь H_2-CH_4
Содержание H_2 в топливе	0, 30, 50 %
p сжатия в ВМТ	6 МПа
T сжатия в ВМТ	780 К
λ	1,6–2,3
Жидкое топливо	Дизельное топливо (JIS№2)
Диаметр сопловых отверстий	$6 \times \varnothing 0,16$ мм
Давление впрыска	100 МПа
Угол начала впрыска	-10,5 град до ВМТ
Угол конца впрыска	-3,2 град до ВМТ
Длительность впрыска	7,3 град ПКВ
Цикловая подача	58 мг

0,16 мм. Форсунка основного топлива ориентирована по оси цилиндра, а струи пилотного топлива сдвинуты относительно оси цилиндра в радиальном направлении. В качестве пилотного было выбрано дизельное топливо JIS № 2. Регистрировались движение иглы форсунки и динамика изменения давления впрыска, чтобы получить более ясное представление о процессе смесеобразования в двухтопливном двигателе. При выполнении однократного такта сгорания начало и конец впрыска определялись по фронту и спаду сигнала подъема иглы форсунки. Цикловая

подача пилотного топлива рассчитывалась исходя из соотношения между массой впрыснутого топлива и длительностью впрыска. Уравнение корреляции было получено путем измерения массы впрыснутого топлива в зависимости от длительности впрыска при нормальных атмосферных условиях. В качестве природного газа в настоящей работе использовался чистый метан CH_4 . Объемная доля H_2 в бинарных смесях $\text{H}_2\text{-CH}_4$ следующая: 0–100 %; 30–70 %; 50–50 %. Значения коэффициента избытка воздуха рассчитывались исходя из соотношения между реагентами и продуктами сгорания. Расчет выполнялся по приведенному ниже уравнению сгорания, которое исключает влияние пилотного топлива на реагенты. Символ α в этом уравнении означает содержание H_2 в бинарном топливе $\text{H}_2\text{-CH}_4$



Для простоты несгоревшие углеводороды в ОГ считаются чистым метаном (CH_4).

Значения a, b, c, d, e, f, g и λ в работе [1] были найдены путем решения системы линейных уравнений, составленных из условий равновесия числа атомов левой и правой частей уравнения, и измеренных значений концентрации каждого из компонентов ОГ.

Воздух для сгорания поступает в цилиндр двигателя из уравнительного бачка, где постоянно поддерживаются высокие значения давления и температуры. Это необходимо для поддержания термодинамических условий на том же уровне, что и в реальных газовых двигателях, несмотря на свойственную машине RCEM низкую степень сжатия. В наших экспериментах давление и температура в ВМТ составляли 6 МПа и 780 К соответственно, а коэффициент избытка воздуха изменялся в пределах от 1,6 до 2,3. Соотношение энергии пилотного и основного топлива в зависимости от коэффициента избытка воздуха, составляло примерно 3 %.

Результаты исследования.

Рабочий процесс при использовании бинарной смеси $\text{H}_2\text{-CH}_4$, воспламеняемой пилотным топливом

На рис. 12 показаны кривые изменения давления в цилиндре, тепловыделения, подъема иглы форсунки и давления впрыска в зависимости от угла поворота коленчатого вала для каждого вида топлива. Для более ясного понимания

картины на рис. 13 приведена серия фотографий процесса сгорания, сделанных через определенные угловые интервалы после воспламенения пилотного топлива. Чтобы снимки удобнее было рассматривать, их яркость была увеличена при обработке. Как известно, воспламенение смеси в двухтопливных двигателях происходит при впрыске струи пилотного топлива, после чего пламя начинает распространяться по камере сгорания. Этот процесс отражается в полученных кривых тепловыделения. На снимках, полученных в машине RCEM, видно несколько ядер пламени, обведенных кружком, которые возникают в момент, когда фронт пламени пересекает середину наблюдаемой области. Эти ядра представляют собой очаги самовоспламенения, резкий рост которых наблюдается на поздней стадии процесса сгорания. Сравнение фото, сделанных при $\text{H}_2\text{30}$ и $\text{H}_2\text{50}$, показывает, что в последнем случае вероятность возникновения подобных очагов возрастает. Независимо от воспламеняемости топливной смеси в малооборотном двигателе всегда остается достаточно времени для самовоспламенения топлива, которое происходит без превышения допустимых пределов скорости нарастания давления и максимального давления в цилиндре. Повышение содержания H_2 приводит к сокращению периода задержки воспламенения [7], что повышает вероятность самовоспламенения.

Первый пик кривой тепловыделения сигнализирует о воспламенении пилотного топлива, которое успело смешаться с газом за время задержки самовоспламенения. Благодаря увеличению скорости сгорания вследствие добавки H_2

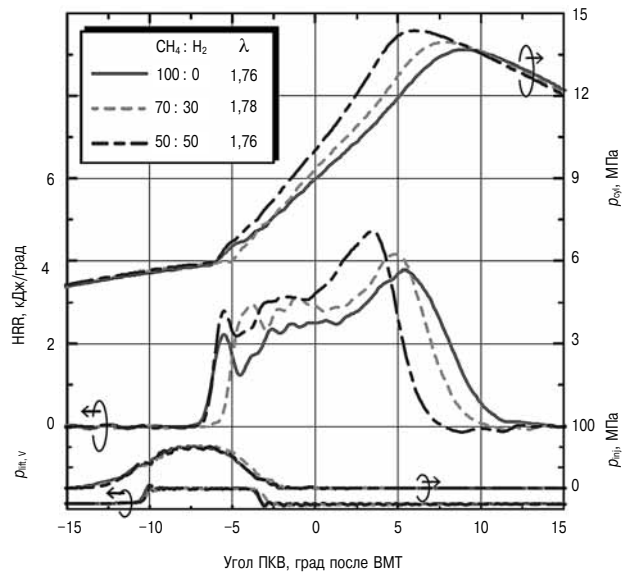


Рис. 12. Кривые изменения давления в цилиндре, тепловыделения, подъема иглы форсунки и давления впрыска в зависимости от угла поворота коленчатого вала для каждого вида топлива при равном значении λ

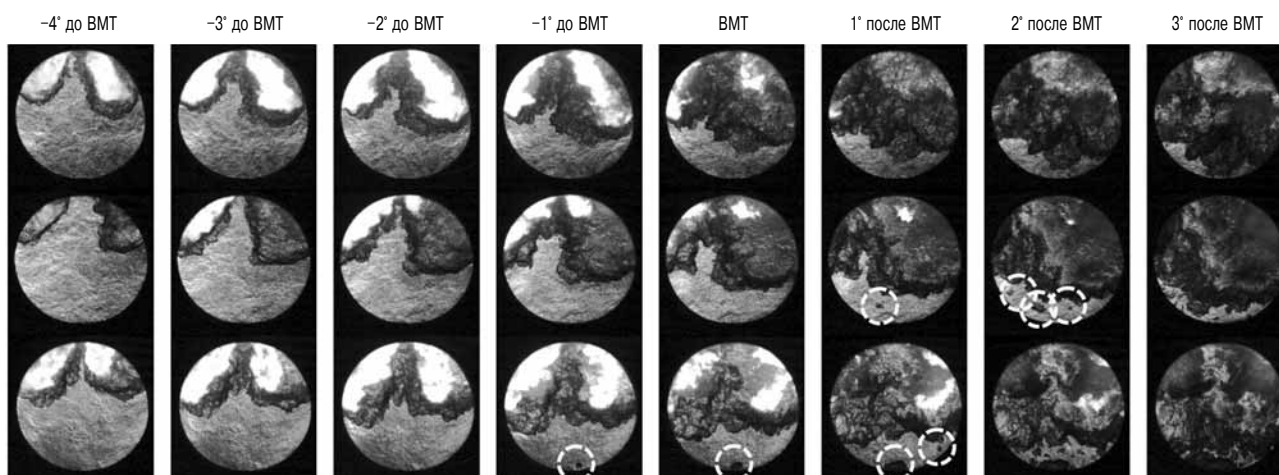


Рис. 13. Снимки, сделанные в интервале от -4 до 3 град после ВМТ для каждого вида топлива (сверху: CH_4 $\lambda = 1,76$, в середине: H_230 $\lambda = 1,78$, внизу: H_250 $\lambda = 1,76$)

длительность сгорания топлива H_250 сократилась примерно на 5 град ПКВ по сравнению с чистым метаном CH_4 . Это вызвало увеличение максимального (пикового) давления сгорания. Яркий факел пилотного топлива на снимках имеет белый цвет, тогда как горение основного топлива характеризуется более тусклым пламенем, которое на снимках выглядит черной тенью. Серия снимков позволяет наблюдать, как увеличивается зона горения, постепенно охватывая всю наблюдаемую область.

Рис. 14 иллюстрирует влияние коэффициента избытка воздуха на скорость тепловыделения. По мере роста коэффициента избытка воздуха длительность сгорания увеличивается. Особенно медленным становится сгорание CH_4 при $\lambda = 2,11$. При этом также сглаживается наблюдавшийся

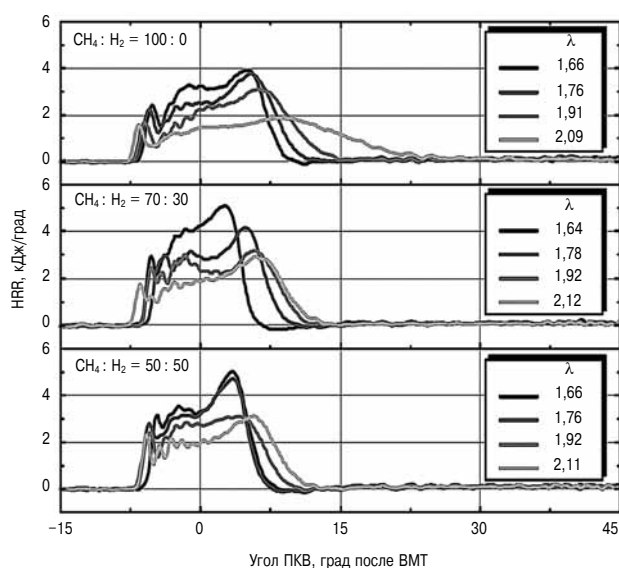


Рис. 14. Кривые зависимости тепловыделения от угла поворота коленчатого вала при различных значениях

ранее резкий рост скорости тепловыделения на поздней стадии сгорания.

На рис. 15 показаны зависимости периода развития факела ($\Delta\theta_{\text{SOI}-10}$), периода распространения пламени ($\Delta\theta_{90-10}$), положения CoS и p_{max} от λ для каждого вида топлива. Периодом развития факела считается интервал времени между моментом начала впрыска топлива и моментом выделения 10% энергии впрыснутого топлива. Периодом распространения пламени считается интервал времени между моментом начала впрыска топлива и моментом выделения 90% энергии впрыснутого топлива. При работе на топливе H_250 при росте λ наблюдалось лишь небольшое увеличение $\Delta\theta_{\text{SOI}-10}$ по сравнению с работой на чистом метане. Это означает, что влияние коэффициента избытка воздуха на $\Delta\theta_{\text{SOI}-10}$ для всех видов топлива невелико. Данный показатель почти не менялся, за исключением некоторых точек при работе на топливе H_250 , которые оказались ниже линии тренда. Вероятная причина этих флуктуаций состоит в том, что локальное самовоспламенение в этих точках начиналось раньше, чем в соседних. Однако тот факт, что добавка H_2 мало влияет на $\Delta\theta_{\text{SOI}-10}$ независимо от величины коэффициента избытка воздуха, плохо согласуется с ранее упомянутым наблюдением, которое показывает, что даже небольшое количество H_2 может приводить к значительному сокращению периода развития пламени. Это противоречие объясняется тем, что в газовых и двухтопливных двигателях период развития пламени определяется разными факторами. В газовом двигателе, работающем на обедненной смеси, длительность этого периода существенно зависит от способности воздушно-топливной смеси к воспламенению. С другой стороны, в двухтопливных двигателях период развития факела главным образом зависит от

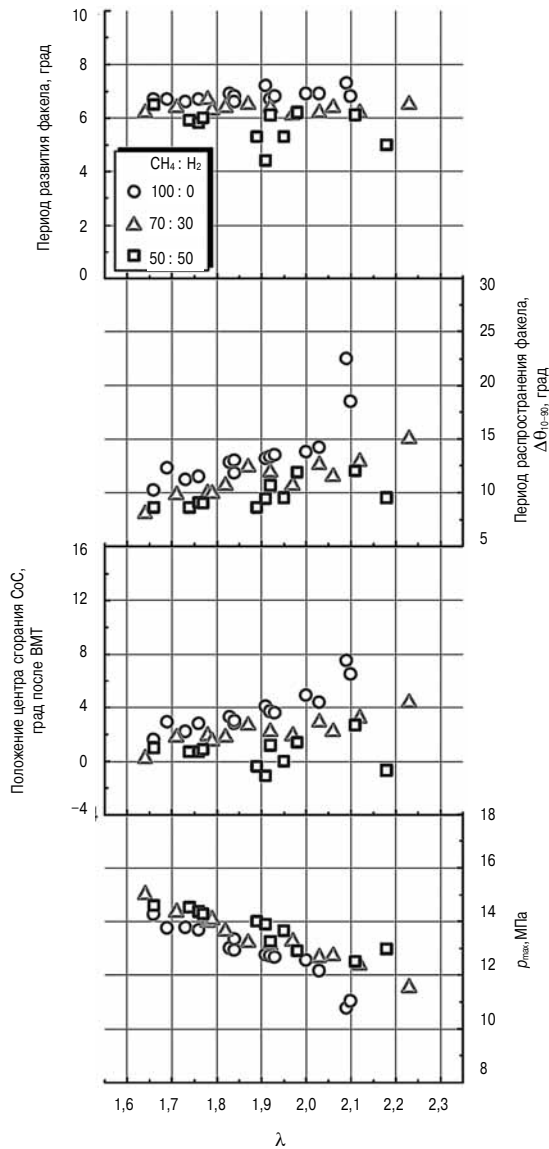


Рис. 15. Зависимость периода развития факела, времени распространения факела, положения центра сгорания и p_{max} от λ для каждого исследуемого вида топлива

задержки самовоспламенения пилотного топлива. В диапазоне варьирования содержания H_2 в горючей смеси влияние задержки самовоспламенения пилотного топлива невелико. Более медленное горение обедненной смеси приводит к росту $\Delta\theta_{SOI-90}$ независимо от содержания водорода. Это заметно при работе на чистом метане, особенно при $\lambda = 2,1$. В этой точке наблюдается значительный рост $\Delta\theta_{10-90}$, так как ускоренное сгорания топлива с добавкой водорода заметно сокращает длительность $\Delta\theta_{10-90}$. Это согласуется с результатами опытов на SCE. Сокращение периода распространения пламени приводит к сдвигу положения CoC. Эта зависимость хорошо видна на обоих рисунках. Увеличение содержания H_2 в топливе приводит к росту максимального давления в цилиндре. Причина

состоит в том, что скорость сгорания при добавке H_2 возрастает, а его длительность соответственно падает. Максимальное давление в цилиндре хорошо коррелирует с коэффициентом избытка воздуха. Его рост был незначительным даже в тех случаях, когда еще до начала горения пилотного топлива происходило самовоспламенение рабочей смеси. Отсюда следует, что раннее самовоспламенение не обязательно ведет к быстрому сгоранию, вызывающему недопустимо быстрый рост давления в цилиндре. Полученный результат говорит также о том, что раннее самовоспламенение обусловлено таким состоянием смеси в цилиндре, которое способствует возникновению ядер пламени, причем эти ядра быстро растут и распространяются по всему объему камеры сгорания. В этом смысле присутствие в топливе H_2 несколько снижает требования к температуре воспламенения, поскольку водород не только способствует самовоспламенению смеси, но и увеличивает скорость распространения пламени. При этом увеличение скорости распространения пламени приводит к повышению температуры сгорания, в результате чего повышается температура газа в цилиндре и температура его стенки. Это способствует образованию горячих зон в камере сгорания, следовательно, вероятность преждевременного самовоспламенения повышается. В установке с однократным рабочим процессом рост температуры промоделировать невозможно, поскольку температура на всасывании и температура стенки цилиндра по условиям эксперимента каждый раз устанавливаются на одном и том же заданном уровне. Поэтому условия преждевременного самовоспламенения, приводящие к превышению допустимого давления в цилиндре, на машине RCЕМ не воспроизводились.

Вредные выбросы

Содержание вредных выбросов измерялось в относительных величинах объемной концентрации, однако результаты представлены в форме удельных выбросов, чтобы учесть разбавление отработавших газов воздухом при работе на обедненной смеси. Выражение для расчета удельных выбросов, выведенное из уравнения (1), имеет следующий вид:

где MW — молекулярный вес; LHV — низшая

$$NO_x emission = \frac{cMW_{NO}}{(1 - \alpha)LHV_{CH_4} + \alpha LHV_{H_2}},$$

теплотворная способность топлива; нижние индексы указывают на соответствующие компоненты смеси.

Аналогичным образом рассчитываются выбросы CO и несгоревшего CH_4 . Результаты расчетов показаны на рис. 16. Каждый тест проводился при фиксированном значении угла на-

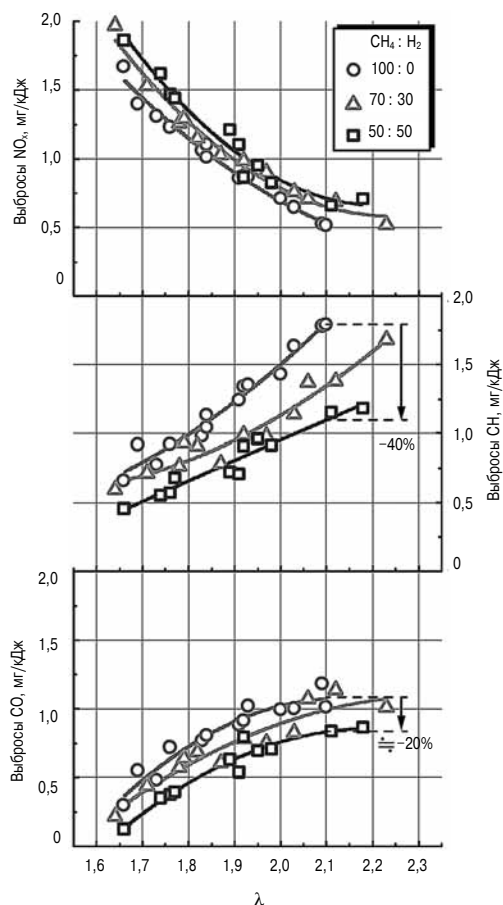


Рис. 16. Выбросы NO_x , несгоревших ТНС и СО в зависимости от λ для каждого вида топлива

чала впрыска пилотного топлива, так что выбросы, показанные на рисунке, получены при неодинаковых положениях СоС.

Удельные выбросы NO_x при переходе к другому виду топлива уменьшались по мере роста коэффициента избытка воздуха. Сравнение выбросов при заданном фиксированном значении коэффициента избытка воздуха показывает, что увеличение содержания H_2 лишь ненамного повышает уровень выбросов NO_x . При этом из-за сокращения длительности горения и смещения углового положения СоС возрастает максимальная температура сгорания. Выбросы несгоревшего CH_4 при переходе к другому виду топлива увеличивались по мере роста коэффициента избытка воздуха. На топливе $\text{H}_2/50$ выбросы несгоревшего CH_4 уменьшились почти на 40 % по сравнению с исходным топливом (CH_4). Расчеты показывают, что замена половины CH_4 на H_2 может уменьшить выбросы несгоревшего CH_4 по сравнению с исходным топливом на 23 %. Как показали результаты исследования, совершенствование рабочего процесса позволяет снизить выбросы несгоревшего CH_4 более радикально, чем простое уменьшение числа атомов

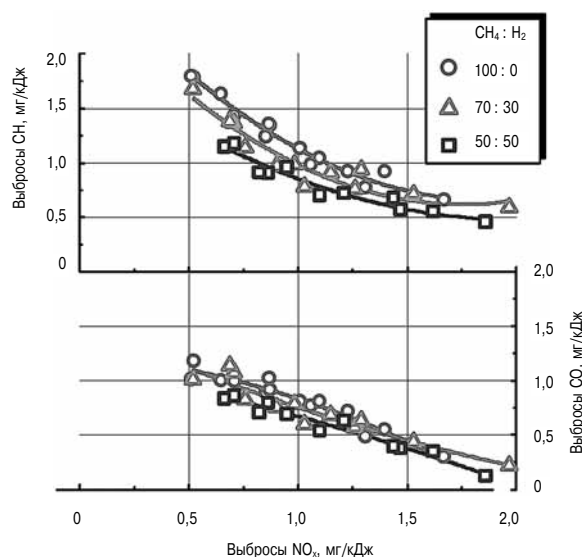


Рис. 17. Кривые, иллюстрирующие оптимальный компромисс между выбросами NO_x -ТНС и NO_x -СО

углерода в топливе. Выбросы СО по мере роста коэффициента избытка воздуха увеличиваются. На топливе $\text{H}_2/50$ выбросы СО по сравнению с исходным топливом (CH_4) уменьшились примерно на 20 %. На рис. 17 показаны кривые, иллюстрирующие оптимальный компромисс между выбросами NO_x -ТНС и NO_x -СО. Значения измеренных величин свидетельствуют о том, что обе кривые благодаря добавке H_2 приблизились к соответствующим кривым для исходного топлива. Это значит, что добавление в топливо H_2 позволяет снизить выбросы ТНС и СО, не увеличивая при этом уровень выбросов NO_x .

Заключение

Настоящая работа была посвящена изучению процесса сгорания в газовом двигателе, работающем на обедненной смеси с добавкой водорода в основное топливо. Визуальное исследование процесса горения было выполнено с целью более глубокого его осмысления. Полученные результаты можно кратко сформулировать следующим образом.

- Добавление водорода в топливо:
 - способствует расширению диапазона допустимых условий работы на обедненной смеси, что дает возможность снизить выбросы NO_x ;
 - не приводит к сколько-нибудь заметному сдвигу границы детонации несмотря на снижение метанового числа;
 - способствует преждевременному самовоспламенению смеси, что ограничивает зону рабочих режимов двигателя.
- Фотографии процесса горения показывают, что наличие водорода в топливе может вызвать самовоспламенение смеси при распространении

фронта пламени. Возможность самовоспламенения ограничивает длительность периодов развития и распространения факела. Вместе с тем, самовоспламенение не приводит к чрезмерному росту максимального давления сгорания.

➤ Процесс самовоспламенения, вызывающий чрезмерно высокую скорость нарастания давления сгорания, может быть связан с высокой температурой в цилиндре. С учетом этого обстоятельства присутствие в топливе H_2 несколько снижает

требования к температуре воспламенения, поскольку водород не только способствует самовоспламенению смеси, но и увеличивает скорость распространения пламени.

➤ Увеличение количества водорода в смеси приводит к уменьшению выбросов CO и THC. Поэтому добавление H_2 позволяет снизить выбросы THC и CO, не увеличивая при этом уровень выбросов NO_x .

Литература

1. AG Energiebilanzen e. V: Arbeitsgruppe Energiebilanzen. <http://www.ag-energiebilanzen.de/>, 1.2.2016.
2. *Gahleitner G.* Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications, *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, 38, 2039–61.
3. *Kawauchi S. et al.* Influence of H_2 addition on engine performance and emission characteristics in premixed lean burn natural gas engines at high specific loads, *Engine Combustion Processes — Current Problems and Modern Techniques — XIIth Congress*, 2015.

4. *Korb B., et al.* Influence of hydrogen addition on the operating range, emissions and efficiency in lean burn gas engines at high specific loads, *Fuel* 164(2016), 410–418.
5. Federal ministry for Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety. Technical instructions on air quality control — TA Luft 6. H. Tajima, et al., Development of High-efficiency Gas Engine through Observation and Simulation of Knocking Phenomena, CIMAC Congress 2010, Bergen, Paper № 213.
7. *Gersen S., et al.* Ignition properties of methane/hydrogen mixtures in a rapid compression machine, *Int. J. Hydrogen Energy* 2008; 33, 2039–61.

РЕФЕРАТЫ СТАТЕЙ

УДК 621.43

Кавтарадзе Р.З. Развитие теории рабочих процессов ДВС в МГТУ им. Н.Э. Баумана: от метода Гриневецкого до современных 3D-моделей // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 3–8.

Ключевые слова: МГТУ им. Н.Э. Баумана, специальность ДВС, кафедра «Поршневые двигатели», создание и развитие теории рабочего процесса, научная школа кафедры ДВС МГТУ. Показана роль кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н.Э. Баумана в развитии фундаментальной теории поршневых двигателей, начиная от основателей специальности «Двигатели внутреннего сгорания (ДВС)», до настоящего времени. Проанализированы актуальные задачи исследования, прежде всего, внутрицилиндровых процессов, решенные на разных этапах развития поршневого двигателестроения усилиями кафедры. Упомянуты направления научно-исследовательских работ по системам газообмена, наддува, топливоподачи, термостойкости ДВС и их влияние на решение проблем совершенствования рабочего процесса. Библ. 21 назв.

УДК 621.436

Лю Ин, Кузнецов А.Г., Харитонов С.В. Анализ индикаторных диаграмм дизельного двигателя при отключении цилиндров // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 9–16.

Ключевые слова: дизельный двигатель, отключение цилиндров, индикаторная диаграмма, потери от насосных ходов, система газораспределения, топливная экономичность. Представлены результаты расчетного исследования работы дизельного среднеоборотного 16-цилиндрового двигателя на режимах малой нагрузки при отключении восьми цилиндров для различных вариантов функционирования системы газораспределения в отключенных цилиндрах. Показано, что улучшение топливной экономичности может быть получено только при закрытии в отключенных цилиндрах всех клапанов. Выполнен анализ индикаторных диаграмм в работающих и отключенных цилиндрах. Дана оценка потерь энергии на насосные ходы при различных вариантах работы системы газораспределения. Ил. 16. Библ. 10 назв.

УДК 621.43

Вальехо Мальдонадо П.Р., Чайнов Н.Д. Уравновешивание V-образных двигателей с угловым смещением шатунных шеек рядом расположенных шатунов // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 17–25.

Ключевые слова: V-образные двигатели, квази-V-образные компоновки, угол развала цилиндров, дезаксаж, уравнове-

шивание, равномерное чередование вспышек.

Рассмотрены вопросы уравновешивания поршневых четырехтактных двигателей, представляющих собой V-образной и квази-V-образную компоновку, с различными углами развала цилиндров, угловыми смещениями шатунных шеек рядом расположенных шатунов, дезаксажем и равномерным чередованием вспышек. Предложены способы уравновешивания моментов сил инерции от вращающихся и возвратно-поступательно движущихся масс в двигателях различной компоновки. Ил. 20. Библ. 17 назв.

УДК 621.43

Лиханов В.А., Лопатин О.П. Сгорание и тепловыделение в дизеле, работающем на смешанном спиртовом топливе // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 26–31.

Ключевые слова: высокооборотные малоразмерные дизели, метанол, этанол, спирто-топливная эмульсия, задержка воспламенения, сгорание, тепловыделение.

Обоснована целесообразность использования в малоразмерных высокооборотных дизелях смешанного топлива на основе метилового и этилового спиртов. Рассмотрены способы получения и применения стабильных к коалесценции спирто-топливных эмульсий (СТЭ) в высокооборотных дизелях. Представлены результаты экспериментальных исследований при работе высокооборотного дизеля размерности Ч11/12,5 на метанол-топливной (МТЭ) и этанол-топливной эмульсиях (ЭТЭ). Определены индикаторные показатели, характеристики процессов сгорания и тепловыделения в сравнении с работой на дизельном топливе. Табл. 3. Ил. 7. Библ. 14 назв.

УДК 355.673:621.182/621.18

Бондарев А.В. Моделирование переходных процессов в твердо-топливных котлах малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 32–38.

Ключевые слова: котлы малой мощности, высокотемпературный кипящий слой, рециркуляция уходящих газов, температура слоя, комбинированные энергоустановки, переходные процессы.

Представлен обзор математических моделей для расчета переходных процессов в котлах малой мощности высокотемпературного кипящего слоя. Приведены расчетные и экспериментальные данные изменения температуры слоя от возмущающих воздействий, вызванных изменением расхода топлива и воздушной смеси. Разработана модель, применимая для моделирования топочных процессов в котлах малой мощности при сжигании угля, торфа

и древесных отходов с рециркуляцией уходящих газов, а также при совместной работе дизель-генератора и твердотопливного активного котла-утилизатора. Ил. 11. Библ. 13 назв.

УДК 621.43

Совершенствование рабочих процессов газовых двигателей (материалы конгресса СИМАС-2016) // Двигателестроение. — 2019. — № 2. — С. 39–63.

Ключевые слова: судовые газовые двигатели, обедненная газо-воздушная смесь, пропуски вспышек, детонация, выбросы несгоревшего метана, газопроницаемая мембрана, добавки водорода, снижение вредных выбросов

Рассматриваются две новые технологии, направленные на совершенствование процесса сгорания обедненной газо-воздушной смеси в цилиндре судового газового двигателя в целях сокращения выбросов метана и расширения поля возможных режимов работы.

Специалистами университета Кюсю (Kyushu University) предложен новый способ снижения выбросов несгоревшего метана с использованием газопроницаемой мембраны (GPM — gas permeation membrane), установленной на выпуске. Мембрана GPM разделяет воздух для сгорания на два потока. Воздух,

обогащенный кислородом (ОЕА — oxygen-enriched air) образуется за мембраной, при этом перед мембраной образуется воздух, обогащенный азотом (NEA — nitrogen-enriched air). Потoki с различным содержанием кислорода подаются в камеру сгорания через отдельные впускные порты, что способствует снижению выбросов СН и детонации.

Специалисты из Мюнхенского технического университета (Technische University Munchen) и университета Кюсю (Kyushu University) выполнили исследование горения в цилиндре двигателя обедненной газовой смеси с добавками водорода (H_2) с целью исключения пропуска вспышек и сокращения выбросов несгоревшего метана. Исследования параметров рабочего процесса были выполнены на одноцилиндровом моторном отсеке для двух вариантов топливных смесей с содержанием $H_2 = 10$ и 30 % (далее HNG10 и HNG30) в сравнении с горением чистого метана. Было установлено, что при работе на смеси HNG10 снижается количество выбросов СО и THC без увеличения образования NO_x . При работе на смеси HNG30 границу пропуска вспышек удалось существенно отодвинуть.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником.

Табл. 15. Ил. 36. Библ. 15 назв.

SYNOPSIS

UDC 621.43

Kavtaradze R.Z. Development of combustion theory in Bauman Technical University: from Grinevetsky method to modern 3D-models // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 3–8.

Keywords: Moscow State Bauman Technical University, Reciprocating Engine Department, specialty internal combustion engines, development of combustion process theory, Bauman Technical University scholar school.

The role of Moscow State Bauman Technical University (Reciprocating Engine Department) in the development of fundamental theory of reciprocating engine up to present time is shown. These authors review investigations carried out by the Department at consequent stages of progress in reciprocating engine building. The works in question have primarily been focused on problems of gas exchange, supercharging, fuel supply, thermal strength etc., and their influence on combustion process. 21 ref.

UDC 621.436

Lyu In, Kuznetsov A.G. and Kharitonov S.V. Indicator diagrams of diesel engine with part of the cylinders shut off // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 9–16.

Keywords: diesel engine, cylinder deactivation, indicator diagram, losses in pump piston strokes, valve timing system, fuel economy. A mathematical model of 16-cylinder middle-speed marine diesel engine was employed to investigate engine behavior under low load in case of deactivation of 8 cylinders, with varying valve timing. It was shown that fuel economy may only be achieved when all the valves in deactivated cylinders are closed. Indicator diagrams for working and deactivated cylinders have been plotted. Energy losses involved in pump piston strokes are evaluated for various configurations of valve timing in deactivated cylinders. 16 ill., 10 ref.

UDC 621.43

Valejo Maldonado H.R. and Chainov N.D. Balancing of V-engines featuring angular offset of crankpins adjacent connecting rods // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 17–25.

Keywords: V-engine, quasi V-type engine layout, vee-angle, desaxage, balancing, uniform spark alteration. The article discusses balancing 4-stroke V- and quasi V-type reciprocating engines, differing in vee-angles, angular offset of adjacent crankpins, and desaxage. Ways are offered of how to balance inertia forces from rotating and reciprocating masses as applied to engines of various cylinder arrangement. 20 ill., 17 ref.

UDC 621.43

Likhanov V.A. and Lopatin O.P. Combustion and heat release in engine firing fuel-spirit mix // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 26–31.

Keywords: high-speed small diesel engines, methanol, ethanol, fuel-spirit emulsion, ignition delay, combustion, heat release, analysis of indicator diagram.

Use of fuel-spirit mix (based on methyl and ethyl spirits) for firing high-speed small diesel engines is recommended. Methods of preparation and usage of fuel-spirit non-coalescing emulsions are

examined. The results are presented of the research into operation of high-speed small diesel engine type CH11/12,5 on methanol-fuel and ethanol-fuel emulsions. Indicated values, combustion performance characteristics and heat release parameters yielded are compared with those of diesel engines. 3 tables, 7 ill., 14 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

Bondarev A.V. Imitation of transients in low-power boilers featuring high-temperature fluidized bed // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 32–38.

Keywords: Low-power boilers, high-temperature fluidized bed, off-gas recirculation, layer temperature, hybrid power plants, transients. The article presents the review of mathematical models for analysis of transients in low-output boilers featuring high-temperature fluidized bed. Also presented is a comparison between calculated and experimental curves of fluidized bed layer temperature vs. disturbances caused by changes in fuel and air flows. A mathematical model is developed suitable for simulation of combustion in low-output boilers operating on coal, peat and woodchips, with off-gas recirculation, as well as conjoint operation of a diesel-generator with a solid-fuelled active waste-heat boiler. 11 ill., 13 ref.

UDC 621.43

Improvements in gas engine combustion processes (based on CIMAC-2016 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2019. — № 2. — P. 39–63.

Keywords: Marine gas engines, lean fuel/air mixture, misfiring, knocking, unburned methane slip, gas permeation membrane, hydrogen additions, emission decrease.

This review is dedicated to two new technologies targeted at the improvement in combustion performance as applied to marine diesel engine operating lean fuel/air mixture, so as to reduce unburned methane slip and extend engine operating range.

A group of researchers from Kyushu University, Japan, offered a new method of unburned methane slip reduction based on a gas permeation membrane (GPM) that is inserted between a compressor and a charge cooler. The membrane splits charge air into two flows. Oxygen-enriched air (OEA) permeates to the secondary side of the membrane, while charge air turns into nitrogen-enriched air (NEA) building upstream of the membrane. NEA and re-compressed OEA flow into a combustion chamber thorough fully separated intake ports. It will be control the knock tendency and decrease THC emission. The international research team from Technische University Munchen and Kyushu University made an investigation into combustion process in marine diesel engine operating lean fuel/air mixture added with hydrogen (H_2) so as to reduce unburned methane slip. Engine operation test for emission performance has been carried out on single-cylinder research gas engine for two fuel mix compositions containing $H_2 = 10$ % and 30 % (referred to as HNG10 and HNG30 respectively), pure methane being used as a baseline case. It was found that use of HNG10 fuel mix results in decrease in CO and THC emissions without compromising NO_x emissions. Use of HNG30 fuel mix allows to substantially extend the misfire limit. The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD. 15 tables, 36 ill., 15 ref.