

## СМАЗОЧНЫЕ МАСЛА ДЛЯ ПОРШНЕВЫХ ДВС (по материалам конгресса CIMAC)

В последние годы наблюдается заметный прогресс в области двигателей внутреннего сгорания, в особенности — среднеоборотных тронковых дизелей, работающих в качестве главных и вспомогательных судовых двигателей. Появляются новые технологии, ориентированные на дальнейшее повышение КПД двигателей и одновременное снижение вредных выбросов. Среди которых наиболее известны цикл Миллера, повышение степени сжатия, а также применение двух- и многотопливных двигателей. В то же время форсировка двигателей ускоряет деградацию смазочного масла и сокращает срок его службы из-за быстрого снижения щелочного числа и увеличения вязкости масла. Можно ожидать, что все эти факторы ускорят создание новых масел, предназначенных для поршневых тронковых среднеоборотных двигателей, учитывая, что предлагаемым сегодня на рынке сортам масел уже больше десяти лет. В настоящем докладе подчеркивается важность использования новых методов моторных испытаний, помимо традиционных методик, и уточняется корреляция между их качеством и методами испытаний. Рассматриваются некоторые аспекты использования опытного одноцилиндрового отсека, работающего на мазуте, с целью демонстрации влияния качества моторного масла на его характеристики, а также полезности данного инструмента для сравнительной оценки эффективности способов улучшения показателей масла, таких как чистота двигателя, контроль вязкости масла и уменьшение запаса его щелочности. Рассматриваются также усовершенствованные программы испытаний и системы управления двигателем для опытного дизеля Caterpillar-AVL фирмы «Shell» (одноцилиндровый дизель AVL типа LEF с крышкой цилиндра от машины Caterpillar 1Y540), чтобы показать, как данный инструмент может быть использован для

получения надежных и повторяемых результатов испытаний, проводимых с целью исследований и сертификации.

Во втором докладе приведены результаты фундаментального исследования с использованием машины быстрого сжатия (RCM — Rapid Compression Machine), предпринятого с целью изучения влияния характеристик масла на изменение периода задержки воспламенения при разных внешних условиях. Преждевременное воспламенение смеси, вызванное смазочным маслом — феномен, который становится все более очевидным по мере увеличения среднего эффективного давления двигателей до уровня 1,8 МПа и более. Процесс сопровождается резким ростом максимального давления в цилиндре, способным вывести двигатель из строя. Данный феномен может стать препятствием для дальнейшего совершенствования двигателей в направлении повышения КПД, поскольку это неразрывно связано с увеличением степени сжатия и среднего эффективного давления. В Японии в качестве топлива для газовых двигателей используется бытовой газ с очень низким метановым числом. По мере расширения использования в газовых двигателях по всему миру LNG, метановое число которого изменяется в широких пределах, упомянутый эффект может проявиться в судовых установках, где метановое число будет меняться в зависимости от уровня LNG в танках. Опыт эксплуатации и стендовых испытаний, показывает, что подобное преждевременное воспламенение смеси является сложным явлением, зависящим от множества факторов, таких, как температура сжатия, коэффициент избытка воздуха, метановое число топливного газа, среднее эффективное давление, и т. п., но численных оценок до сих пор не проводилось.

*Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником*

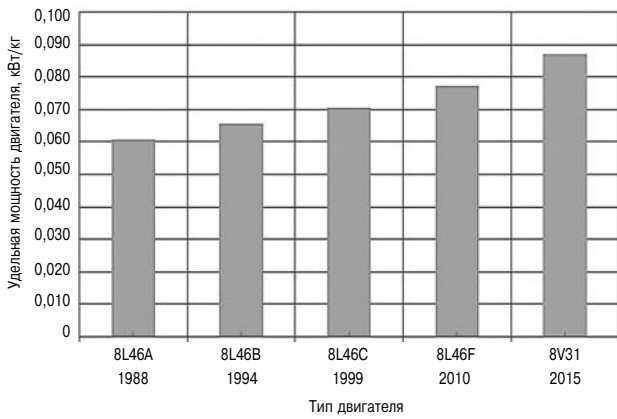
### РАЗРАБОТКА СМАЗОЧНЫХ МАСЕЛ ДЛЯ СОВРЕМЕННЫХ ТРОНКОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

*Jose Luis Garcia, Stefan Schleper,  
Shell Global Solutions (Deutschland) GmbH  
John Schakel,  
Shell Global Solutions Internationa*

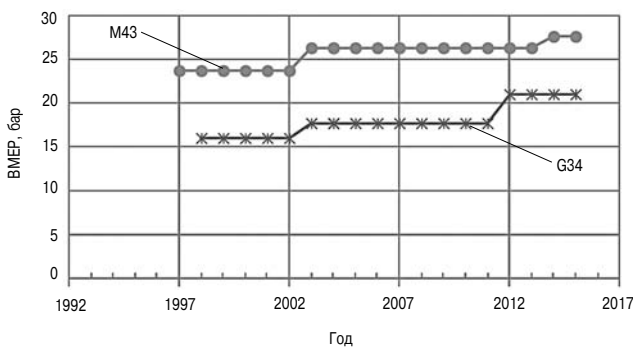
### Перспективы совершенствования конструкции двигателей

Стремление заказчиков снизить себестоимость своей продукции побуждает двигателестроителей непрерывно совершенствовать свои машины с целью повышения их топливной экономичности, способности к использованию различных топлив, а также снижению ущерба, наносимого окружающей среде. За последние 20 лет существенно повысился такой показатель, как удельная мощность (кВт/кг). Например, для двигателей Wartsila L46 он увеличился с 0,061 (версия 8L46A) до

0,077 кВт/кг (версия 8L46F), т. е. на 26 %. Фирма «Wartsila» запустила в производство машину W31, ставшую значительным шагом вперед с точки зрения удельной мощности. Для двигателя W31 этот показатель составляет 0,087 кВт/кг, т. е. на 43 % выше, чем у двигателя 8L46A (рис. 1). Аналогичным образом, удельная мощность двигателей «Caterpillar MAK» возросла с 0,058 (двигатели 6M43 1998 г. постройки) до 0,068 кВт/кг (2014 г.), т. е. на 17 %. Для того, чтобы повысить КПД двигателя, непрерывно совершенствовался его рабочий процесс, повышалось максимальное давление сгорания, и тем самым — среднее эффективное давление (рис. 2). Совершенствование турбокомпрессора позволило реализовать цикл Миллера, растет число двигателей, оборудованных системами common rail с электронным впрыском, что позволяет повысить давление впрыска во всем диапазоне нагрузок.



**Рис. 1. Рост удельной мощности двигателей Wartsila L46**



**Рис. 2. Динамика изменения среднего эффективного давления для двух моделей двигателей Caterpillar MAK за последние 20 лет**

В системах common rail машинное масло используется также как гидравлическая жидкость, что повышает требования к его чистоте. В настоящее время почти во всех двигателях удельный расход масла (SLOC) удалось снизить благодаря использованию антиполировочных колец и набора колец с оптимизированной геометрией, что позволяет повысить давление в цилиндре и КПД двигателя. Все больше судов оборудуются двухтопливными двигателями, как главными, так и вспомогательными. Это дает операторам более широкий выбор топлива и возможность подготовиться к переходу на газообразное топливо, например, LNG. В то же время значительная часть двигателей продолжает работать только на жидком топливе. Концепция двухтопливного двигателя предполагает возможность переключения с жидкого на газообразное топливо. Поскольку в последнем случае расход жидкого топлива намного ниже, во избежание образования нагара на стенках цилиндра из-за раннего самовоспламенения, необходимо было решить некоторые проблемы, связанные с обеспечением необходимой смазки при работе двигателя преимущественно или исключительно на жидком топливе.

**Влияние деградации масла на работу двигателя**

Как уже отмечалось ранее [1], непрерывное совершенствование современных среднеоборотных двигателей приводит к ускоренной деградации масла под действием следующих факторов:

- рост среднего эффективного давления (BMEP);
- снижение удельного количества масла в поддоне картера (кг/кВт);
- снижение расхода масла, и, соответственно, увеличение интервалов смены масла;
- увеличение рабочих температур;
- рост удельной мощности двигателей.

Все перечисленные выше факторы приводят к значительному росту нагрузки на масло, которое деградирует гораздо быстрее, чем в двигателях предыдущих поколений. То же самое количество масла деградирует и выбрасывается в атмосферу быстрее, чем в двигателях предыдущего поколения. На рис. 3 показаны изменения OSF по мере совершенствования конструкции двигателей МАК. Способность масла осуществлять свои основные функции, в частности, поддерживать чистоту двигателя, быстро уменьшается. Деградацию масла и ухудшение его показателей можно отслеживать простыми аналитическими способами, позволяющими определять основные свойства масла, такие, как вязкость<sup>1</sup>, базовое число (BN)<sup>2</sup> и загрязнение<sup>3</sup>.

Различные авторы [1–3] исследовали такие моменты, как соотношение между расходом масла  $R$  (г/кВт·ч), (называемого также удельным расходом масла  $bsoc$ ), общим количеством масла в двигателе на киловатт мощности  $V$  (г/кВт) и временем  $t$  (ч) работы залитого масла. Предположив, что расход масла полностью компенсируется добавкой свежего масла в систему, коэффициент деградации масла (OSF) может быть определен в соответствии с [1]. Этот коэффициент, имеющий размерность кВт·ч/г, представляет собой отношение мощности к соответствующим процессам деградации масла, накапливающимся в нем за интервал времени  $t$ :

$$OSF = \frac{1}{R} \left( 1 - e^{-\frac{Rt}{V}} \right),$$

где  $R$  — удельный расход масла ( $bsoc$ ), г/кВт·ч;

<sup>1</sup> В соответствии с ASTM D445-15 Standard Test Method for Kinematic Viscosity of Transparent and Opaque Liquids (and Calculation of Dynamic Viscosity) in conjunction with ASTM D446-12 Standard Specifications and Operating Instructions for Glass Capillary Kinematic Viscometers.

<sup>2</sup> В соответствии с ASTM D2896-11 Standard Test Method for Base Number of Petroleum Products by Potentiometric Perchloric Acid Titration.

<sup>3</sup> В соответствии с ASTM D893-14 Standard Test Method for Insolubles in Used Lubricating Oils.

$V$  — количество масла в поддоне, г/кВт ;  $t$  — время, ч; OSF — коэффициент деградации масла, кВт·ч/г.

На бесконечном промежутке времени  $t$  экспонента стремится к нулю, а это означает, что максимальное значение OSF равно  $1/R$ . Иначе говоря, по мере роста ожидаемого срока службы масла OSF непрерывно растет, достигая максимума, который зависит только от величины  $bsoc$ .

Концепция OSF может быть использована непосредственно в качестве критерия для принятия решения о смене масла. При этом надо знать, каково его максимально допустимое значение для используемого масла. Разумно предположить, что способность масла противостоять деградации (скорость достижения предельно допустимых значений) зависит от его сорта. И наоборот, для различных двигателей и различных применений нужны масла, способные выдерживать различные уровни OSF, чтобы обеспечить работу на протяжении бесконечного или заданного интервала смены масла (например, при редких процедурах техобслуживания).

С точки зрения физических и химических процессов, величина OSF (в кВт·ч/г) отражает энергию, приложенную к каждому грамму масла за время  $t$ . Следовательно, OSF прямо зависит от количества продуктов сгорания, попадающих в картер, т. е. сажи, кислот и нерастворимых веществ. Данный параметр позволяет сравнивать различные двигатели и различные рабочие условия, чтобы оценить степень влияния обоих факторов на деградацию масла.

Следует пересмотреть механизм деградации масла с точки зрения средств, используемых при разработке масел. Новые эффективные смазки должны удовлетворять все более жестким требованиям, а опытные двигатели, программы и условия испытаний должны обеспечить выявление критических значений деградации масла. Эти значения должны быть достаточны, чтобы удовлетворять требованиям жестких эксплуатационных условий, и в то же время отсеивать заведомо неподходящие варианты составов смазки.

#### Среднеоборотные опытные двигатели Shell: Испытательный стенд Cat-AVL и двигатель W4L20D

Изложенная в настоящем докладе программа разработки новых масел включает использование двух типов двигателей: Shell Cat-AVL и W4L20D.

Двигатель Shell Cat-AVL — известная, хорошо отработанная модель, давно использовавшаяся при разработке новых масел [1]. Этот одноцилиндровый двигатель, наряду с двигателем W4L20, был использован для наиболее всесторонней оценки масел-кандидатов. Размеры и мощностные параметры данного отсека, а также программа и

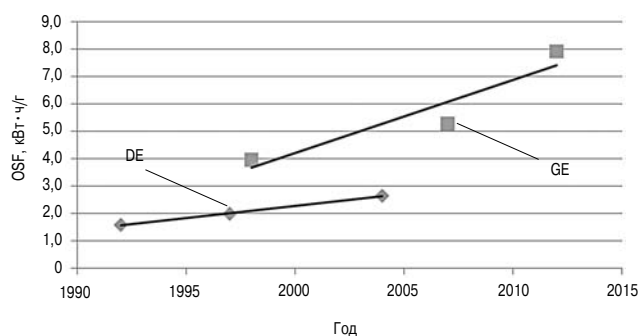


Рис. 3. Изменение OSF двигателей МАК:

DE — diesel engines (расчетные значения SLOC от 1,0 до 0,6 г/кВт·ч); GE — gas engines (расчетные значения SLOC от 0,4 до 0,2 г/кВт·ч)

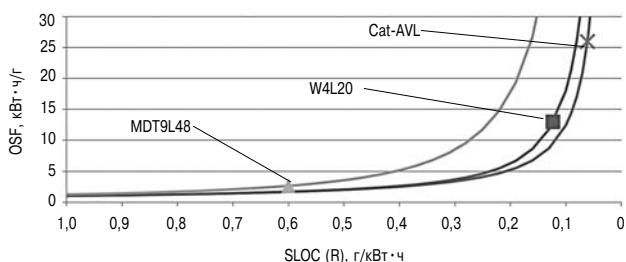


Рис. 4. Воздействие стресс-факторов на масло. Сравнительные результаты, полученные на среднеоборотных дизелях в эксплуатационных условиях. Данные, использованные в расчетах, представлены в табл. 1

Таблица 1

#### Параметры двигателя

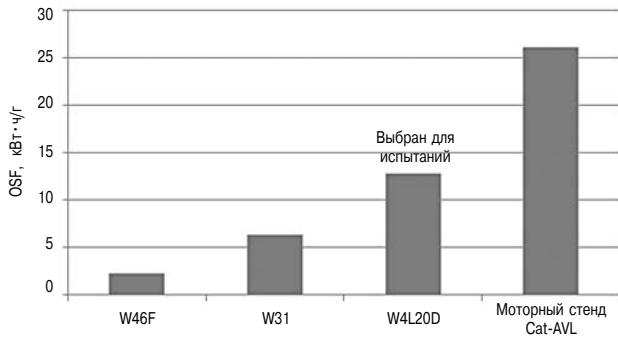
	Опытный двигатель		
	Cat-AVL	W4L20	MDT L48/60
Количество масла в поддоне, кг	7,24	144,8	7288
Мощность двигателя, кВт	53	800	10350
Удельный расход масла, г/кВт·ч	0,06	0,12	0,60
Удельное количество масла в поддоне, кг/кВт	0,14	0,18	0,70
Срок службы/время воздействия стресс-факторов, ч	2241	1468	1174

методика испытаний его позволяют детально изучить большую группу масел-кандидатов.

Установки для испытаний, использованные при разработке масел для двигателей грузовиков (ТРЕО) с учетом факторов деструкции масла, проиллюстрированы рисунками 3 и 4. Условия испытаний таковы, что масла подвергаются более тяжелым нагрузкам, чем на двигателях, работающих в реальной эксплуатации или на высокофорсированных среднеоборотных двигателях.

#### Опытный двигатель CAT-AVL

Опытный двигатель Shell's Caterpillar-AVL представляет собой отсек дизеля AVL типа LEF



**Рис. 5. Воздействие стресс-факторов на масло. Сравнительные результаты, полученные на среднеоборотном двигателе Shell и на серийных двигателях Wartsila W46F и W31. Данные, использованные в расчетах, представлены в табл. 2**

Таблица 2

**Параметры двигателей Wartsila и Shell test engines**

Двигатель	W46F	W31	W4L20	Cat-AVL
Диаметр цилиндра, мм	460	310	200	137
Ход поршня, мм	580	430	280	168

с крышкой от двигателя Caterpillar 1Y540. Для этого двигателя была разработана специальная программа испытаний, кроме того, он был оборудован новейшей аппаратурой управления и контроля, что позволило получить надежные и повторяемые результаты испытаний, которые можно будет использовать при исследованиях и приемочных испытаниях. Стендовый двигатель позволяет выбрать из нескольких исследуемых сортов масел наиболее перспективные, подтвердившие свою робастность и готовность к дальнейшим испытаниям на полноразмерных двигателях, таких, как Shell Wartsila 4L20, а также на серийных двигателях, находящихся в эксплуатации в условиях, позволяющих произвести сравнительную оценку качества масел.

Испытательный стенд с одноцилиндровым отсеком типа Cat-AVL имеет ряд преимуществ по сравнению со стендами на базе полноразмерных среднеоборотных двигателей. Для него требуется гораздо меньше топлива и масла. Значительно сокращаются расходы на запчасти и техобслуживание. Кроме того, все вспомогательные системы гораздо меньше по размеру, и при этом обеспечивают более точный мониторинг и контроль параметров.

Все процессы, происходящие в каждом цилиндре многоцилиндрового двигателя, в той или иной степени влияют на работу остальных цилиндров. Кроме того, параметры рабочего процесса могут меняться под действием иных, помимо качества масла, факторов. Анализ причин возникновения тех или иных аномалий гораздо удобнее проводить на одноцилиндровом отсеке,

нежели на многоцилиндровом двигателе, где может возникнуть какая-то одна из нескольких возможных аномалий (например, обесцвечивание, повышенный износ или более интенсивные отложения). На одноцилиндровом отсеке её причины гораздо легче выявить.

Испытательный стенд с одноцилиндровым отсеком — штучное изделие, тогда как многоцилиндровый двигатель обычно является серийным изделием, приспособленным для испытательных целей. Это значит, что конструкция одноцилиндрового двигателя и условия испытаний могут быть более точно приведены в соответствие с целями данных испытаний.

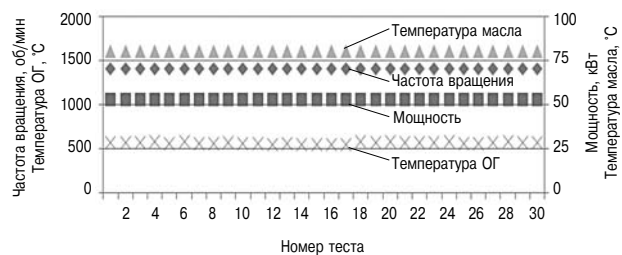
**Программа испытаний Cat-AVL**

Каждый цикл испытаний включает 2 часа приработки и 96 часов ресурсных испытаний при постоянной нагрузке. По завершении цикла анализируется качество масла. Оно определяется по износу и загрязнению поршня, поршневых колец и втулки цилиндра. Загрязнение оценивается по шкале ASTM для высокофорсированных двигателей.

Таблица 3

**Конструктивные размеры и рабочие параметры двигателя Cat-AVL**

Параметры двигателя	Величина
Диаметр цилиндра, мм	137
Ход поршня, мм	168
Скорость двигателя, об/мин	1400
Мощность двигателя, кВт	52
ВМЕР, бар	18,2
Надпоршневой зазор, мм	5,73
<b>Параметры при испытаниях двигателя (настройки)</b>	<b>Величина</b>
Разрушающая нагрузка, Нм	360
Температура воды на выходе, °С	80
Температура масла, °С	80
Давление масла для охлаждения поршня, кПа	360
Давление наддува, кПа	260
Температура воздуха на всасывании, °С	80
Противодавление на выпуске, кПа	130
Содержание серы в топливе, % м/м	1–3



**Рис. 6. Стабильность параметров работы двигателя Cat-AVL при испытаниях (усредненные значения по каждому из 96-часовых циклов)**

Основные рабочие параметры приведены в табл. 3. При этом учитываются только результаты, полученные в одинаковых условиях. Партия топлива должна оставаться одной и той же для каждой серии испытаний, а каждая серия должна проводиться с новым поршнем и новой цилиндрической втулкой. Графики изменения четырех основных параметров в течение 30 тестовых прогонов показаны на рис. 6.

#### **Составление рецептуры высокоэффективных ТРЕО**

Для среднеоборотных двигателей, работающих на мазуте, применяются только специально подобранные смазочные материалы. Большое содержание асфальтенов в тяжелых топливах приводит к тому, что значительная их часть переходит в масло. Во избежание смолообразования и формирования осадка на стенках камеры сгорания масло должно содержать специальные моющие присадки. Работа на высокосернистых топливах ведет к образованию серной кислоты, что приводит к усиленному износу поршневых колец и втулок цилиндров, если масло не имеет достаточного запаса щелочности. Учитывая большой срок службы масла, для очистки его от воды и продуктов сгорания используются сепараторы. Состав смазок для среднеоборотных двигателей должен обеспечивать легкое отделение воды и продуктов сгорания в сепараторе.

Высокоэффективные ТРЕО представляют собой особый класс масел для работающих на мазуте среднеоборотных двигателей, в которых условия работы масла особенно тяжелы, что связано с очень низким расходом масла, высокой форсировкой двигателей и/или использованием высокосернистых топлив.

ТРЕО должны быть оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить:

- эффективный контроль и предотвращение образования отложений;
- большой и длительный запас щелочности;
- контроль разжижения масла.

Такая оптимизация позволяет продлить срок службы масла, уменьшить частоту и объем доливов («осветление») масла, а также снизить эксплуатационные расходы. Операторы, использующие такие масла, получают существенный выигрыш в виде повышения надежности и снижения общих эксплуатационных затрат.

#### **Чистота двигателя**

Способность машинного масла поддерживать и восстанавливать чистоту двигателя является результатом сложного взаимодействия различных свойств масла, таких, как антиоксидантный эффект, термостабильность, растворяющая способность, диспергируемость и моющая способность, в условиях, когда в нем накапливаются загряз-

нители и продукты старения. Почти все присадки к маслу могут рассматриваться как поверхностно-активные вещества (ПАВ). Эти ПАВ могут конфликтовать между собой за доступ к смазываемой поверхности, особенно при их избытке. Поэтому даже небольшие изменения в концентрации различных ПАВ могут давать преимущества тому или иному компоненту при доступе к поверхности. Непрерывные изменения условий в пограничных областях 4-тактных двигателей делает результат взаимодействия различных ПАВ непредсказуемым.

Моделирование столь сложных систем на основе лабораторных испытаний и/или математического анализа практически невозможно. Испытания на машинных стендах или в лабораторных условиях обычно проводятся с целью определения отдельных свойств масла, таких как термостабильность, устойчивость к окислению или способность к выпадению осадков при высоких температурах. Это является традиционным способом сравнительных испытаний масел-кандидатов. Однако подобные методы не позволяют воспроизвести быстрые динамические изменения, происходящие в реальном двигателе внутреннего сгорания. Поэтому полученные результаты являются лишь предварительными и неполными. Выводы, сделанные на их основании, требуют обязательного подтверждения опытом работы двигателя в реальных условиях эксплуатации.

Испытания, проведенные на двигателе Cat-AVL в ходе разработки смазок для среднеоборотных дизелей, позволили лучше понять механизмы влияния ПАВ на чистоту двигателя. Выяснилось, что эффект от ПАВ, входящих в состав щелочных моющих присадок, не обязательно прямо пропорционален концентрации присадки в масле. Исследователи пришли к заключению, что для данного уровня щелочности масла (выражаемой щелочным числом [мгКОН/г]) существует некоторый оптимальный уровень ПАВ. Как показали наблюдения, несбалансированное соотношение между запасом щелочности и содержанием ПАВ может привести к ослаблению чистящего эффекта масла.

#### **Испытания высокоэффективных ТРЕО на двигателе Cat-AVL**

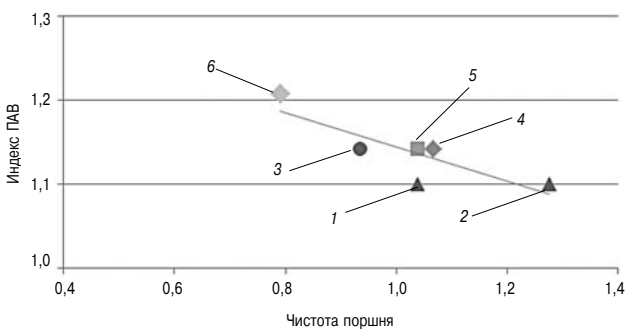
На испытания были поставлены две группы кандидатов с двумя различными уровнями щелочности. Все кандидаты — это ТРЕО, считающиеся высокоэффективными маслами. Каждая группа кандидатов имела одно и то же значение щелочного числа, выраженного в мгКОН/г. Кандидаты различались соотношением между концентрацией поверхностно-активных компонентов (входящих в состав моющих присадок)

и запасом щелочности. Это соотношение, которое мы называем индексом поверхностно-активных веществ (SASI - Surface Active Substances Index), обратно пропорционально содержанию ПАВ в масле. Все масла-кандидаты являются машинными маслами SAE 40, составленными из одинаковых базовых масел и присадок. Состав каждого масла был постоянным, за исключением поверхностно-активных компонентов.

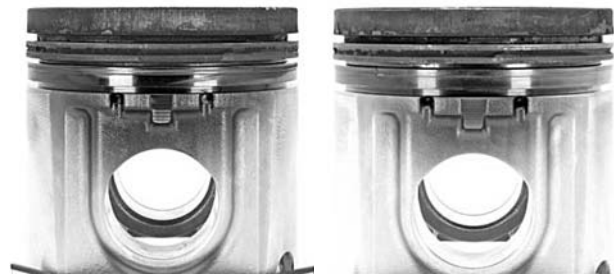
**Испытания масел с высоким значением щелочного числа (BN)**

На рис. 7 показаны значения показателя SASI для двигателя Cat-AVL при заданной величине запаса щелочности масла  $55 \pm 2$  мгКОН/г, полученные при испытаниях масел-кандидатов с высоким значением щелочного числа (лучшие результат соответствует более низкому значению показателя чистоты). Это заставляет предположить, что хорошо сбалансированное (по данному соотношению) масло может дать лучшие результаты на современных полноразмерных дизелях, и что большое содержание ПАВ в масле не обязательно говорит о его лучшей моющей способности. Еще один вывод по результатам данного эксперимента состоит в том, что при данных условиях испытаний на дизеле Cat-AVL среди масел-кандидатов можно выбрать лучшие варианты по эффективности очистки двигателя. Стандартные лабораторные пробы, взятые для испытаний на окисляемость в большом объеме, или на выпадение осадка, дают лишь незначительную разницу между маслами, особенно при больших значениях щелочного числа.

На рис. 7 представлены масла-кандидаты с высоким BN (щелочное число при  $55 \pm 2$  мгКОН), прошедшие испытания на двигателе Cat-AVL. Значения сравниваются с результатами испытаний серийного ТРЕО с высоким BN. Лучшие результаты соответствуют более низкому значению показателя чистоты. Фотографии поршней показаны на рис. 8–11. Наиболее заметны различия между действием разных масел в нижней части



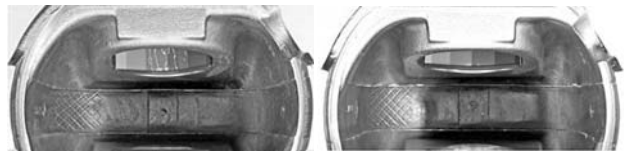
**Рис. 7. Соотношение между индексом поверхностно-активных веществ (SASI) и чистотой поршня (в относительных единицах)**



Вид со стороны маховика

**Рис. 8. Кандидат № 2 (худший образец).**

**Рис. 9. Кандидат № 6 (лучший образец).**



Вид днища поршня изнутри

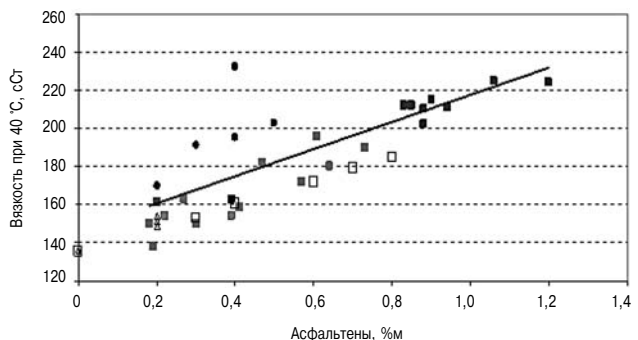
**Рис. 10. Кандидат № 2 (худший образец).**

**Рис. 11. Кандидат № 6 (лучший образец).**

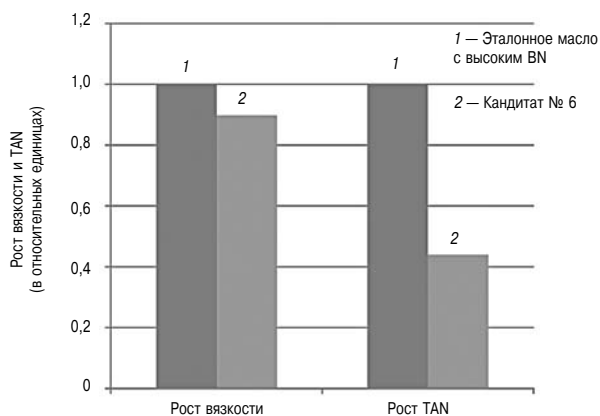
поршня, в районе 3-го кольца и 3-й канавки, а также на верхней и нижней оконечности юбки поршня. Наихудшие результаты показало масло № 2 (рис. 8), а наилучшие — масло № 6 (рис. 9).

Различие в интенсивности отложений в области непосредственно под днищем поршня не столь явственны, как на юбке поршня, на кольцах и стенках канавок для колец, но для наметанного глаза специалиста они достаточно заметны (рис. 10 и 11).

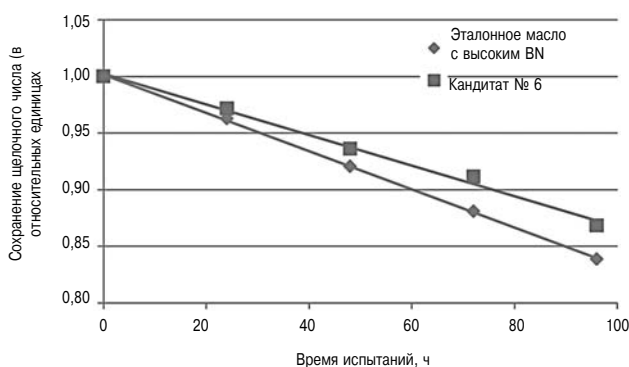
Отличительной особенностью программы испытаний масел на двигателе Cat-AVL в данном случае является наличие пиковых выбросов масла с топливом, имитирующих загрязнение топлива, в особенности асфальтенами, что характерно для среднеоборотных двигателей, работающих на мазуте. Известно, что способность масла раство-



**Рис. 12. Вязкость испытанных образцов аналогичного серийного сорта масла при температуре 40 °С в зависимости от содержания асфальтенов, наблюдаемая при испытаниях на различных двигателях, работающих на мазуте**



**Рис. 13. Регулирование вязкости и окисляемости масел-кандидатов с высоким значением BN**



**Рис. 14. Сохранение щелочного числа масел-кандидатов с высоким значением BN**

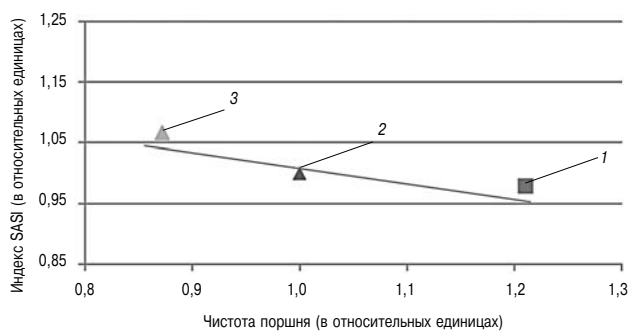
рять и/или диспергировать асфальтены прямо связана с его моющими свойствами [1]. Можно предположить, что в нашем случае более высокие моющие свойства масла свидетельствуют о его большей устойчивости к асфальтенам.

Известно также, что загрязнение масла асфальтенами и сложность их отделения коррелирует со сгущением масла, как показано на рис. 12. Можно ожидать, что, если в нашем случае моющая способность масла также коррелирует с его устойчивостью к асфальтенам, то оно менее склонно к загустеванию. На рис. 13 приведены данные, подтверждающие увеличение вязкости выбранного масла-кандидата по сравнению с эталоном. Результаты испытаний свидетельствуют о более эффективном контроле вязкости опытного образца масла. Кроме того, полученные результаты позволяют отметить, что масла, хорошо сбалансированные в отношении SASI, накапливают меньше продуктов старения. Это способствует увеличению запаса щелочности при работе (если она не расходуется для нейтрализации агрессивных кислот, образующихся при сгорании серы), поскольку установлено, что продукты старения могут также стимулировать образование (слабых) кислот, способных поглотить часть запаса

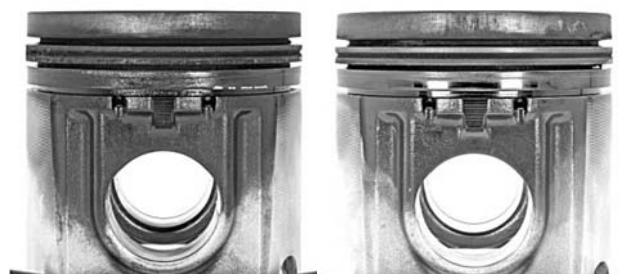
щелочности. На рис. 13 и 14 показаны графики изменения во времени кислотного числа<sup>4</sup> и запаса щелочности по сравнению с эталонным образцом, подтверждающие улучшение обоих показателей.

#### Испытания группы масел с низким BN

Кроме испытаний масел-кандидатов с высоким значением BN, были проведены аналогичные испытания масел с низким значением BN ( $20 \pm 2$  мгКОН/г) SAE 40 TPEO. На рис. 15 показана зависимость индекса ПАВ (SASI) от чистоты двигателя для масел-кандидатов с низким значением BN ( $20 \pm 2$  мгКОН/г) SAE 40 TPEO. Значения SASI даны в относительных единицах по сравнению с аналогичными показателями серийных TPEO с низким значением BN.



**Рис. 15. Индекс ПАВ (SASI) в зависимости от чистоты двигателя**



**Вид со стороны маховика**

**Рис. 16. Кандидат № 1 (худший образец).**

**Рис. 17. Кандидат № 3 (лучший образец).**



**Вид днища поршня изнутри**

**Рис. 18. Кандидат № 1 (худший образец).**

**Рис. 19. Кандидат № 3 (лучший образец).**

<sup>4</sup> — В соответствии с документом ASTM D664-11 «Стандартные методы замера кислотного числа нефтепродуктов с помощью потенциометрического титрования»

На рис. 16–19 визуализированы результаты, полученные для лучших и худших образцов масел-кандидатов с низким значением BN.

Испытания образцов с низким значением BN проводились на маслах, загрязненным топливом, что воспроизводит условия, встречающиеся в реальной эксплуатации (например, в двухтопливных двигателях, где работа в газовом режиме требует низкой зольности масла, а в дизельном режиме используются жидкие малосернистые топлива (не более 1,5 % серы), содержащие асфальтены).

Аналогичные наблюдения при испытаниях масел-кандидатов с низким значением BN на SASI и моющую способность подтверждают теоретические выводы о том, что большее количество поверхностно-активных ингредиентов не обязательно повышают качество масла (в части моющей способности). Если сравнивать лучшие образцы с высоким и низким значениями BN, можно обнаружить существование определенного оптимума SASI для данного запаса щелочности.

#### Испытания двигателя W4L20

##### на масле, показавшем лучшие результаты

Двигатель Wartsila 4L20D, работающий на мазуте, был поставлен на длительные испытания продолжительностью более 500 часов. Испытания подтвердили более высокую моющую способность образца масла № 6, что совпадает с результатами предыдущих испытаний на двигателе Cat-AVL.

На рис. 20 и 21 приведены изображения фрагмента поршня снаружи и изнутри после

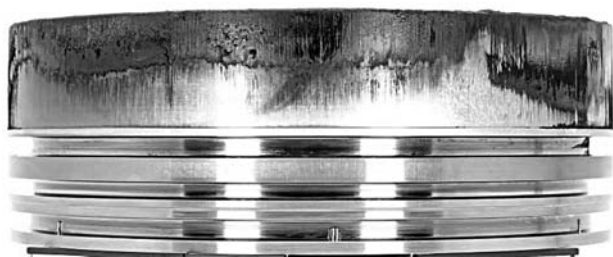


Рис. 20. Юбка поршня Wartsila 4L20D (цилиндр № 2 вид спереди)



Рис. 21. Юбка поршня Wartsila 4L20D (цилиндр № 2 вид днища поршня изнутри)

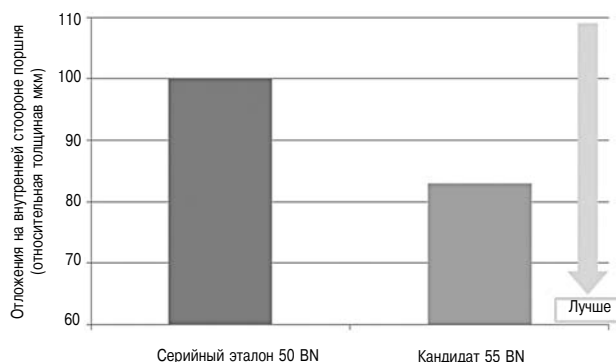


Рис. 22. Отложения во внутренней полости поршня (как пример моющей способности масла)

испытаний, для которых были отобраны масла с высоким значением BN, показавшие лучшие результаты на предыдущих испытаниях, проводившихся на двигателе Cat-AVL. На рис. 22 показаны результаты сравнения с серийным эталоном (по отложениям на внутренней поверхности поршня).

Опытные партии масел-кандидатов с высоким BN поставлены на эксплуатационные испытания. Одновременно на эксплуатационные испытания поставлены аналогичные серийные масла, выбранные в качестве эталонов.

#### Заключение

➤ Интенсивность нагрузок на масло в современных двигателях непрерывно растет, что связано с ужесточением требований к их топливной экономичности и вредным выбросам. Масла для таких двигателей должны иметь более высокие показатели качества, обеспечивающие надежность, эффективность и экономичность работы двигателей. К числу таких показателей относятся моющая способность, устойчивость к асфальтенам, контроль вязкости и сохранение запаса щелочности.

➤ Разработка опытных двигателей (например, одноцилиндровых отсеков), представляющих собой, по существу, модели реальных двигателей в меньшем масштабе, имеет целью обеспечить переход от лабораторной установки к моторному стенду и серийному двигателю. Оказалось, что опытные одноцилиндровые двигатели, как правило, гораздо удобнее контролировать, чем многоцилиндровые. Более точное определение рабочих условий, значений мощности, температуры, давления, расходов топлива и масла дает возможность корректно сравнивать результаты различных тестов, и следовательно, сравнивать показатели различных масел-кандидатов, одновременно увеличивая пропускную способность испытательного оборудования.

➤ Результаты, полученные для разных рабочих режимов на двигателе Cat-AVL при ресурсных



испытаниях, позволяют выделить масла-кандидаты с лучшими показателями моющей способности. Эти результаты показывают выраженную зависимость моющей способности от соотношения между концентрацией ПАВ и запасом щелочности, обозначенным в настоящем исследовании как индекс ПАВ (SASI). Отсюда следует, что хорошо сбалансированные в этом смысле масла в современных многоцилиндровых двигателях покажут наилучшую моющую способность.

➤ Эксплуатационные испытания, проводимые с целью разработки смазочных масел на полно-размерных двигателях, являются весьма ресурсоемкими. Они занимают большое время, требуют значительных затрат на запчасти, оплату персонала, топливо и масло. Более того, ценность таких испытаний ограничена, поскольку в рамках коммерческой эксплуатации довольно трудно обеспечить контроль и мониторинг рабочих условий, поэтому испытания лучше проводить при полностью контролируемых условиях. Испытания на моторных стендах — самый надежный способ отбора кандидатов для окончательных испытаний при контролируемых и повторяемых условиях. При этом также появляется возможность сравнивать показатели опытных продуктов и многочисленных серийных продуктов, хорошо отработанных в эксплуатационных условиях. Следует признать, что, по сравнению с лабораторными исследованиям, испытания на моторных стендах являются более ресурсоемкими и занимают больше времени. Они требуют тщательного планирования, к тому же универсальность полученных результатов может быть ограничена, если речь пойдет о других применениях или

других продуктах, имеющих принципиально другой химический состав.

#### Условные обозначения и сокращения

TPEO	Масло для двигателей грузовиков (Truck Piston Engine Oil)
SLOC	Удельный расход масла (Specific Lube Oil Consumption), г/кВт ч
LNG	Сжиженный природный газ (Liquefied Natural Gas)
BMEP	Среднее эффективное давление (Break Mean effective Pressure)
OSF	Стресс-фактор (Oil Stress Factor), кВт ч/г
BSOC	Удельный расход масла (Brake Specific Oil Consumption)
BN	Щелочное число (Base Number), мгКОН/г
ASTM	Международная Организация по стандартизации (Standardization Organization ASTM International, USA)
SASI	Индекс поверхностно-активных веществ (Surface Active Substance index)

#### Литература

1. *Barnes, Foster, Hengeveld, Schasfoort, Scheele.* «Oil Stress Investigations in Shell's Medium Speed Laboratory Engine», Paper № 21, CIMAC Congress 2004, Kyoto.
2. *Hengeveld Cannon, Scheele.* «A Model for Lubricant Stress in Modern Medium Speed Diesel Engines and its Verification in a Wartsila 4L20 Laboratory Engine», CIMAC Congress 1998, Copenhagen.
3. *Garcia Ojeda, Hammett, Schakel, Moeller.* «Cylinder Lubrication - Utilising the latest findings on Low Speed 2-Stroke Diesel engine oil stress from field and laboratory engine testing in the development of a Wide Range Cylinder Lubricant — Shell Alexia S4», Paper № 84, CIMAC Congress 2013, Shanghai.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ФАКТОРОВ, ВЫЗЫВАЮЩИХ ПРЕЖДЕВРЕМЕННОЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЕ СМАЗКИ В ЦИЛИНДРЕ**

*Shinji Yasueda, GDEC inc.  
Tatsuya Kuboyama, Mitsuhiro Matsumura,  
Yasuo Moriyoshi, Chiba University  
Valerie Doyen, Jean-Baptiste Martin, TOTAL*

**Введение**

Воспламенение смеси, вызванное смазочным маслом (далее обозначаемое как LOP — Preignition caused by Lubricating Oil) — явление, наблюдаемое все чаще по мере роста среднего эффективного давления в двигателях, работающих на заранее подготовленной смеси, в частности, на автомобильных [1–4]. Это не только повышает вероятность поломки двигателя в результате превышения допустимого давления сгорания, но и приводит к мощным циклическим колебаниям давления сгорания из-за его стохастической природы, что, в свою очередь, ведет к снижению КПД, поскольку требует снижения среднего давления сгорания [5]. Данный эффект проявляется тем сильнее, чем выше среднее эффективное давление и степень сжатия. Поэтому он становится серьезным препятствием на пути повышения мощностных и экономических показателей двигателей.

С другой стороны, по мере расширения использования в газовых двигателях по всему миру LNG, метановое число которого изменяется в широких пределах, упомянутый эффект также может проявиться, в особенности — в судовых установках, где метановое число будет уменьшаться при снижении уровня LNG в танках [6]. Как показано авторами, подтвержденные случаи LOP возникают только при следующих условиях [7]:

Первая фаза: температура в цилиндре достигает температуры воспламенения масла.

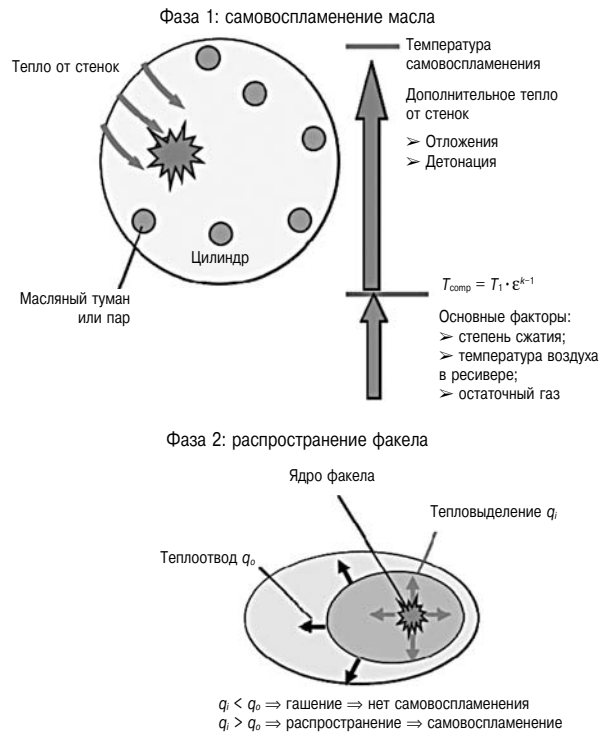
Вторая фаза: возникают условия для стабильного распространения факела пламени, вызванного возгоранием масла, когда тепловыделение  $q_i$  превышает теплоотвод  $q_o$  в радиальном направлении (рис. 1).

Тепловыделение  $q_i$  рассчитывается по следующей формуле:

$$q_i = Q k A n V \exp(-E/RT), \quad (a)$$

где  $Q$  — теплотворная способность;  $k$  — число столкновений молекул;  $A$  — концентрация молекул;  $n$  — порядок химической реакции;  $T$  — температура.

Фактором, в наибольшей степени влияющим на тепловыделение  $q_i$ , является температура смеси в момент самовоспламенения смазки. А это означает, что температура сжатия сильнее всего влияет не только на самовоспламенение смазки (первая стадия), но и на распространение инициированных им факелов горячей смазки



**Рис. 1. Механизм аномального сгорания**

(вторая стадия). Как показали исследования, проведенные на работающих двигателях, где наблюдалось LOP, а также испытания различных двигателей на LOP, температура в диапазоне от 730 до 790 К достаточна для самовоспламенения смазочного масла, но недостаточна для устойчивого распространения факела.

Кроме того, как следует из приведенного выше уравнения, более богатая смесь, меньшее метановое число газового топлива и более высокое значение ВМЕР ускоряют LOP благодаря более интенсивному тепловыделению при одинаковой температуре сжатия. Действительно, LOP в разных двигателях чаще происходит в случае использования более богатой смеси, топлива с более низким метановым числом и рабочего процесса с более высоким значением ВМЕР.

Однако поиск решений для предотвращения LOP при высоких значениях ВМЕР (среднего эффективного давления) или при низком метановом числе, не приводящих к ухудшению таких показателей как ВМЕР, термический КПД или стоимость двигателя, до сих пор не увенчался успехом, поскольку:

- > LOP — сложное явление, зависящее от многих факторов;
- > для этого необходим контроль локальных условий в каждом отдельном цилиндре;
- > в большинстве случаев меры по снижению вероятности LOP влекут за собой ухудшение того или иного показателя качества двигателя или увеличение его стоимости.

Тем не менее, возможность для достижения стабильного сгорания без риска развития LOP или детонации существует, и частично была реализована при разработке газовых двигателей. Трудность состоит в том, что количественные оценки влияния упомянутых выше факторов на возникновение LOP пока еще недостаточно надежны. В настоящее время ведутся работы по анализу условий, при которых LOP возникает на различных двигателях, с использованием RCM (машины быстрого сжатия).

#### Оценка факторов, влияющих на LOP

##### Диапазон стабильного горения

При проектировании газового двигателя основные рабочие параметры, такие как степень сжатия, температура воздуха в ресивере и т. п., выбираются таким образом, чтобы обеспечить достаточно большой диапазон («окно») стабильного сгорания, охватывающий все рабочие режимы.

Пример такого окна показан на рис. 2. Оно представлено в координатах момента начала сгорания и температуры воздуха в ресивере. На этапе оптимизации параметров двигателя основное внимание обычно уделяется таким параметрам, как граница детонации и предельный угол задержки воспламенения, который определяется как угол, при котором нестабильность сгорания превышает допустимый предел.

Например, если заданный уровень температуры воздуха в ресивере составляет 50 °С, считается, что параметры двигателя выбраны правильно, поскольку диапазон изменения угла зажигания составит приблизительно 10°ПКВ даже при увеличении температуры воздуха в ресивере до 60 °С в штатном режиме.

Но в последнее время, когда для проектантов газовых двигателей правильный выбор становится серьезной проблемой, возникла необходимость учитывать LOP при определении границы окна стабильного сгорания.

В нашем примере LOP может возникнуть при позднем воспламенении, если температура воздуха в ресивере по какой-либо причине превысит заданное значение. Такой причиной может

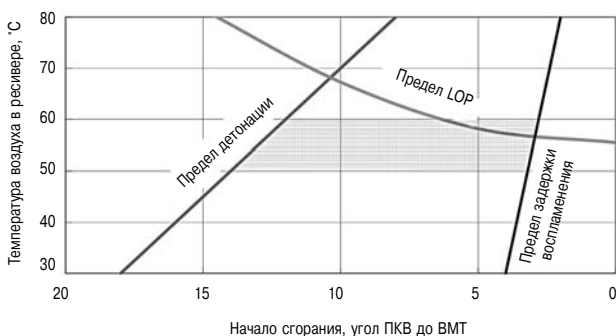


Рис. 2. Окно стабильного сгорания

стать значительное повышение температуры окружающего воздуха, снижение эффективности промежуточного воздухоохладителя, и т.п.

#### Влияние факторов LOP

Была проведена большая работа по сбору и анализу информации по опытным и находящимся в эксплуатации двигателям, где имели место случаи LOP. Такая информация необходима для определения основных параметров LOP при проектировании газового двигателя, чтобы можно было обеспечить окно достаточно стабильного сгорания.

В табл. 1 показано влияние ВМЕР, метанового числа и коэффициента избытка воздуха на температуру сжатия, при которой начинается LOP (предел LOP). Приведенные в табл. 1 значения температуры сжатия рассчитаны по следующей формуле:

$$T_{\text{comp}} = T_{\text{in}} \cdot CR^{\lambda(k-1)}, \quad (a)$$

где  $T_{\text{comp}}$  — температура сжатия;  $T_{\text{in}}$  — температура воздуха в ресивере;  $CR$  — степень сжатия;  $k$  — показатель адиабаты.

ВМЕР был выбран как один из наиболее значимых параметров, поскольку в будущем именно LOP, вероятнее всего, станет решающим фактором, ограничивающим рост ВМЕР, который сопровождается увеличением мощности двигателей с целью снижения их себестоимости. Метановое число также имеет большое значение, поскольку в будущем, как ожидается, судовые газовые двигатели, главные и вспомогательные, будут постепенно переходить с бытового газа на LNG, у которого метановое число ниже.

Влияние превышения коэффициента избытка воздуха на LOP, отраженное в табл. 1, рассчитано в предположении, что подразумевается средний (глобальный) коэффициент избытка воздуха в главной камере сгорания. Однако здесь большее значение имеет местный (локальный) коэффициент избытка воздуха. Дело в том, что возникновение LOP при прочих равных условиях (факторах влияния) более вероятно в области максимального обогащения смеси. Следовательно, влияние  $\lambda$  на LOP зависит от состава смеси. При использовании «бедной» смеси влияние  $\lambda$  на LOP относительно невелико.

С другой стороны, в форкамерном двигателе с искровым зажиганием большинство LOP может происходить именно в форкамере, где смесь намного богаче, чем в основной камере сгорания.

С учетом этих обстоятельств, в табл. 1 приводятся цифры, усредненные по нескольким типам двигателей, в которых LOP происходили в основной камере сгорания. Для того, чтобы проверить влияние коэффициента избытка воздуха ( $\lambda$ ) в форкамере на LOP, необходим отдельный эксперимент с разными значениями  $\lambda$  в форкамере.

Таблица 1

Влияние различных факторов на предел LOP

Изменение параметров	$\Delta T_{\text{сomp}}$ на пределе LOP
ВМЕР — на +10 %	–30 К
Метановое число — на –10 %	–25 К
Коэффициент избытка воздуха — на –10 %	–40 К

Влияние упомянутых параметров может быть неоднозначным, в зависимости от характеристик двигателя. Данные, приведенные в табл. 1 — величины, усредненные по нескольким среднеоборотным газовым двигателям.

Как показано на рис. 3, по мере повышения температуры сжатия вероятность возникновения LOP постепенно возрастает. Существует широкое окно температуры сжатия (зона «А» на рис. 3), в которой большинство циклов, где происходит самовоспламенение, не заканчиваются LOP, вызывающим резкий рост максимального давления сгорания. Поэтому измерение температуры сжатия, при которой происходит только самовоспламенение смазочного масла, для установления предела LOP (т. е. граничной линии, за которой начинается LOP) недостаточно. Для этого необходимо измерять температуру сжатия там, где вероятность возникновения LOP явно начинает расти в пределах зоны «А». Считается, что предел LOP определяется как температура сжатия, при которой вероятность возникновения LOP превышает 0,3 %.

Исследовалось также влияние на детонацию ВМЕР, метанового числа и коэффициента избытка воздуха. Результаты этого исследования приведены в табл. 2. Влияние этих параметров

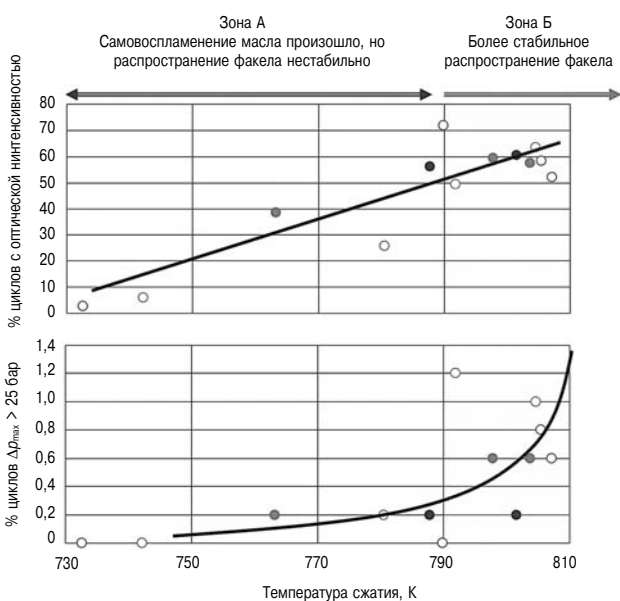


Рис. 3. Рост LOP из-за увеличения  $T_{\text{сomp}}$

Таблица 2

Влияние различных факторов на предел детонации

Изменение параметров	Задержка самовоспламенения на пределе детонации
ВМЕР — на +10 %	–30 К
Метановое число — на –10 %	–25 К
Коэффициент избытка воздуха — на –10 %	–40 К

на детонацию существенно зависит от таких параметров двигателя, как степень сжатия, коэффициент избытка воздуха и т. п. Но, чтобы количественно оценить окно стабильного, с точки зрения LOP и детонации, сгорания, был проведен анализ факторов, влияющих на LOP, результаты которого для типичного среднеоборотного двигателя приведены в табл. 2.

На рис. 4 показано окно стабильного сгорания при значениях ВМЕР = 2 и 2,2 МПа, рассчитанных по значениям влияния ВМЕР на пределы LOP и возникновения детонации в том же двигателе (см. табл. 1 и 2). На рис. 4 температура воздуха в ресивере, соответствующая пределу LOP, рассчитана по значениям температуры сжатия на пределе LOP и эффективной степени сжатия для каждого значения задержки самовоспламенения.

При ВМЕР = 2 МПа окно значений задержки самовоспламенения составляет порядка 10 °ПКВ, что достаточно для работы двигателя при различных условиях окружающей среды при температуре воздуха в ресивере 50 °С.

С другой стороны, при увеличении ВМЕР на 10 % окно стабильного сгорания заметно сужается, при этом начало воспламенения на границе детонации отодвигается на 2 °ПКВ, а температура воздуха в ресивере на границе LOP снижается примерно на 13 °С.

В результате, даже при поддержании температуры воздуха в ресивере в пределах 45–50 °С при наличии задержки воспламенения следует

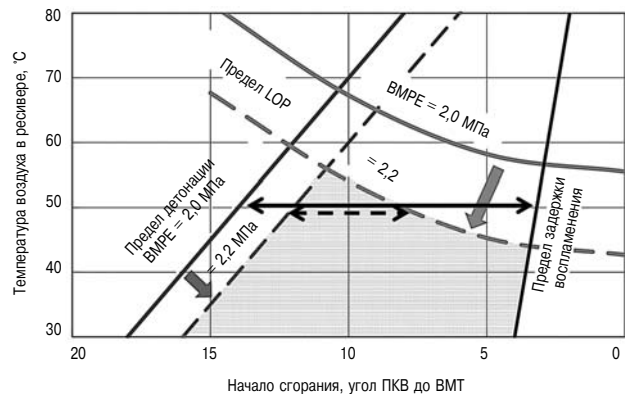
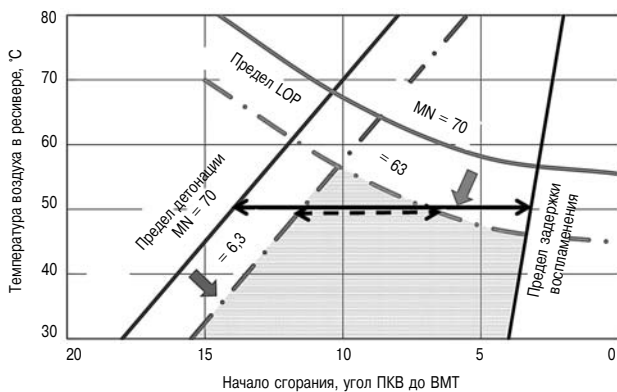


Рис. 4. Окно стабильного сгорания при высоких значениях ВМЕР



**Рис. 5. Окно стабильного сгорания при низких значениях MN**

ожидать возникновения LOP. Кроме того, окно начала воспламенения без возникновения LOP и детонации при температуре воздуха в ресивере 50 °C составляет лишь 4 °ПКВ, поскольку при задержке воспламенения возникает вероятность LOP. Это означает, что для увеличения ВМЕР на 10% придется менять какие-то характеристики двигателя, например, степень сжатия.

На рис. 5 показаны границы стабильного сгорания при значениях метанового числа 70 и 63, рассчитанные по параметрам влияния метанового числа на границы LOP и детонации, приведенным соответственно в табл. 1 и 2, при одинаковых характеристиках двигателя.

Как следует из рис. 5, уменьшение метанового числа на 10 % оказывает примерно такое же влияние на границы детонации и LOP, как увеличение ВМЕР на 10 %. Даже при поддержании температуры воздуха в ресивере в пределах 46–50 °C при наличии задержки воспламенения следует ожидать возникновения LOP.

В результате снижения метанового числа на 10 % уменьшается окно задержки воспламенения примерно на 50 % (при температуре воздуха в ресивере 50 °C), с 10 °ПКВ при MN = 70 до 5 °ПКВ при MN = 63, при этом момент воспламенения на границе детонации отодвигается на 2,5 °ПКВ, а температура воздуха в ресивере на границе LOP снижается примерно на 11 °C. Отсюда следует, что в случае снижения метанового числа на 10% необходимо будет принять какие-то меры для предотвращения LOP.

Следует учитывать еще и то обстоятельство, что граница LOP, как и граница детонации, со временем снижается из-за накоплений отложений в цилиндре.

Зависимость склонности детонации от уровня отложений в цилиндре хорошо известна. То же самое можно сказать и о LOP, поскольку в обоих случаях наличие отложений способствует повышению температуры сжатия.

Повышение температуры сжатия объясняется двумя параллельно идущими процессами. Во-первых, из-за отложений уменьшается объем камеры сгорания при нахождении поршня в ВМТ, во-вторых, теплота, накопленная в слое отложений на такте сгорания, на тактах всасывания и сжатия следующего цикла отдается рабочей смеси. Численных расчетов количества возвращаемого тепла не проводилось. Однако, на основании измерений фактической величины порога LOP на различных двигателях, было установлено, что эти отложения могут приводить к снижению температуры сжатия на границе LOP на 20–30 К, что соответствует снижению температуры воздуха в ресивере примерно на 10 °C.

Отсюда следует, что для обеспечения стабильности процесса после наработки достаточного количества моточасов необходим запас по температуре воздуха в ресивере порядка 10 °C.

На рис. 6 показано, как изменяется порог LOP в зависимости от ВМЕР и метанового числа (см. табл. 1). Зависимости, изображенные на рисунке, построены для температуры воздуха в ресивере 45 °C, принятой за эталон. Отсюда следует, как можно компенсировать изменение порога LOP воздействуя на другие факторы за счет изменения степени сжатия.

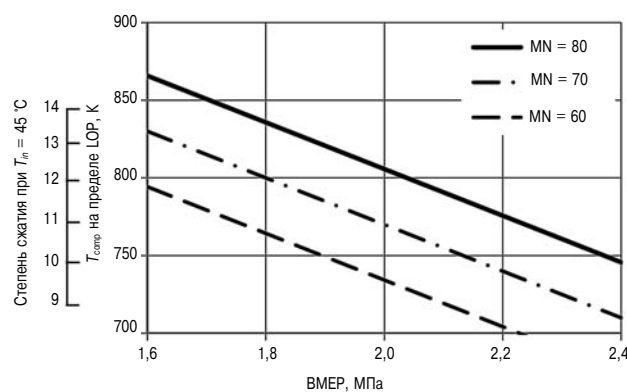
При росте ВМЕР на 10 %:

- уменьшить степень сжатия примерно на 1,1
- или увеличить допустимое значение метанового числа примерно на 10.

При уменьшении метанового числа на 10:

- уменьшить степень сжатия примерно на 1,3
- или уменьшить максимальное значение ВМЕР примерно на 12 %.

Как становится понятно из уравнения (а), наиболее эффективным способом предотвращения как LOP, так и детонации, является уменьшение температуры сжатия за счет уменьшения степени сжатия. Однако в большинстве случаев это приводит к снижению термического КПД. Кроме того, в случае двухтопливного двигателя снижение



**Рис. 6. Влияние ВМЕР и MN на положение границы LOP**

степени сжатия ограничивается тем обстоятельством, что сопутствующее снижение температуры сжатия приводит к нестабильности зажигания пилотного топлива. В этом смысле оптимизация параметров двухтопливного двигателя оказывается несколько сложнее, чем для двигателя с искровым зажиганием.

Помимо снижения степени сжатия, существует еще одно средство, уменьшающее риск предотвращения и детонации — снижение температуры воздуха в ресивере. Однако сделать это не так-то просто, учитывая ограниченный диапазон снижения температуры охлаждающей воды. Кроме того, это решение связано с увеличением объема и стоимости промежуточного воздухоохладителя.

С учетом всех этих факторов, увеличение коэффициента избытка воздуха оказывается одним из наиболее рациональных способов снижения риска LOP при увеличении ВМЕР или при уменьшении метанового числа. Влияние коэффициента избытка воздуха на LOP показано на рис. 7 (см. табл. 1). При рассмотрении данных на рис. 7 может создаться впечатление, что уменьшение метанового числа на 10 может быть компенсировано увеличением коэффициента избытка воздуха на 10 % либо увеличением ВМЕР примерно на 10 %. Однако, как отмечено выше, необходимо знать минимальный коэффициент избытка воздуха и уменьшить его на 10 %, поскольку с наибольшей вероятностью LOP происходит в тех областях, где обогащение смеси достигает максимума, а увеличение среднего коэффициента избытка воздуха не сможет предотвратить LOP, если локальный минимальный коэффициент избытка воздуха остался прежним или увеличился незначительно.

Поэтому, чтобы снизить вероятность LOP при большем коэффициенте избытка воздуха, необходимо исследовать распределение коэффициента избытка воздуха по объему цилиндра и принять необходимые меры для обеднения

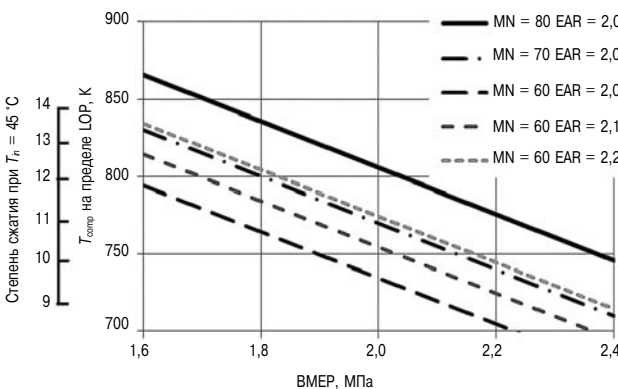


Рис. 7. Влияние коэффициента избытка воздуха EAR на положение границы LOP

локальной зоны с переобогащенной смесью. Для этой цели необходим анализ с использованием методов точной газодинамики [8, 9].

Как следует из рис. 7, ВМЕР и метановое число влияют на порог LOP достаточно сильно, и это обстоятельство является серьезным препятствием для дальнейшего повышения ВМЕР при использовании газов с метановым числом, изменяющимся в широких пределах, что характерно для современного газового рынка.

При работе на газе с высоким ВМЕР при низком значении метанового числа возникает необходимость в более эффективных мерах по предотвращению LOP. Пока что, однако, такие меры разработать не удалось. Таким образом, при создании новых газовых двигателей очень важна количественная оценка факторов, влияющих на LOP. Это позволит оптимизировать параметры двигателя таким образом, чтобы можно было предотвратить возникновение как LOP, так и детонации.

**Фундаментальный эксперимент для выявления механизмов воспламенения масла**

Анализ, описанный в предыдущем разделе, подтвердил значительное влияние ВМЕР, метанового числа и коэффициента избытка воздуха на LOP. Кроме того, было подтверждено, что развитие LOP происходит в две стадии: самовоспламенение смазочного масла и распространение пламени. Однако не удалось выяснить, на какой из двух стадий в большей степени проявляется влияние изменений ВМЕР, метанового числа и коэффициента избытка воздуха. Чтобы получить ответ на этот вопрос, был проведен фундаментальный эксперимент с использованием RCM (машины быстрого сжатия).

**Методика эксперимента**

Основные характеристики машины RCM и ее принципиальная схема приведены в табл. 3 и на рис. 8.

Таблица 3

**Основные характеристики RCM**

Диаметр цилиндра и ход поршня, мм	80,4×95
Длительность такта сжатия, мс	50
(Давление в резервуаре, МПа)	(0,37)
(Скорость двигателя, об/мин)	(600)

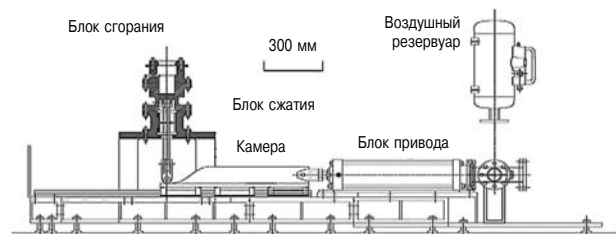
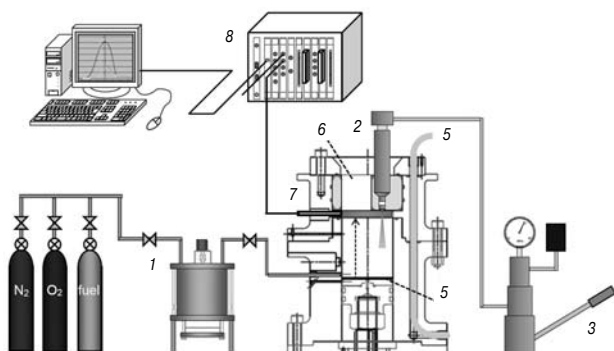


Рис. 8. Схема RCM



**Рис. 9. Экспериментальная установка:**

1 — бак рабочей смеси; 2 — пьезовпрыск; 3 — ручной насос; 4 — поверхность поршня; 5 — нагретая вода; 6 — кварцевое стекло; 7 — датчик давления; 8 — WE800 (регистратор данных)

Вид экспериментальной установки показан на рис. 9. Рабочая смесь с заданными значениями коэффициента избытка воздуха и температуры перед подачей в цилиндр готовится заранее.

На первом этапе были предприняты попытки организовать быструю подачу заряда в цилиндр через электромагнитный клапан, с целью поддержания заданной температуры в цилиндре до начала сжатия, минимизируя таким образом отвод тепла через стенки цилиндра, поскольку точное измерение исходной температуры смеси перед началом такта сжатия необходимо для точного расчета температуры сжатия. Однако, как выяснилось, такой способ подачи заряда приводит к колебаниям количества смеси в цилиндре. Поэтому методика была изменена. Количество подаваемой в цилиндр смеси точно дозировалось вручную, при этом температура стенки цилиндра изменялась с учетом температуры смеси путем соответствующего изменения температуры охлаждающей воды. Тем самым достигались обе поставленные цели — задание нужной температуры смеси в момент начала сжатия и прецизионное дозирование ее количества.

Предполагается, что рабочая смесь в цилиндре на такте сжатия может состоять из двух фаз — мельчайших капель и пара, образующихся в ходе следующих процессов:

- разрушение находящейся на поверхности цилиндрической втулки масляной пленки в результате соприкосновения с цилиндрическими кольцами и под воздействием гидродинамических потоков;
- стекание капель со штока впускного клапана в рабочую смесь на такте всасывания;
- попадание мельчайших капель масла из картера в поток воздуха перед турбокомпрессором;
- часть этих капель остается в жидком состоянии до начала горения, остальные испаряются на такте сжатия.

Чтобы воспроизвести условия в цилиндре реального двигателя, где рабочее тело состоит из

смеси капель и пара, в начале такта сжатия небольшая порция масла впрыскивается в цилиндр с помощью пьезокристаллической форсунки. Данный метод не позволяет имитировать наличие масляной пленки на стенках цилиндрической втулки, так как нельзя было рассчитывать на то, что эта пленка сгорит на такте сжатия, хотя именно пленка является источником масляного тумана и паров.

После предварительного опробования множества вариантов, были выбраны: количество впрыснутого масла за цикл, давление впрыска и конфигурация форсунки. Выбранные варианты должны были удовлетворять следующим требованиям:

- количество впрыснутого масла должно быть в пределах цикловой подачи реального двигателя, т. е. примерно от 0,2 до 0,6 г/кВт·ч;
- повторяемость количества впрыснутого масла должно быть малой;
- ударное воздействие струи впрыснутого масла на стенку цилиндрической втулки должно быть не слишком сильным.

По результатам предварительного тестирования были выбраны параметры впрыска, приведенные в табл. 4, которые, должны обеспечить оптимальный баланс между перечисленными выше требованиями.

Визуализация процесса впрыска, выполненная с помощью высокоскоростной камеры, показала, что определенное соударение струи выходящего масла со стенками цилиндра имеет место. При этом самовоспламенения масла в точках соударения струи масла со стенками цилиндра не наблюдалось. Отсюда следует, что приведенные в табл. 4 параметры впрыска адекватно отражают процессы, происходящие в реальном двигателе, и могут быть использованы для моделирования самовоспламенения масла в цилиндре.

Цикловой впрыск масла был выбран на уровне 0,1 мг. Это соответствует расходу масла 0,5 г/кВт·ч, что близко к верхнему пределу для реального среднеоборотного двигателя, при этом вероятность возникновения LOP становится достаточно большой.

В ходе предварительных испытаний проверялось также влияние температуры масла на момент самовоспламенения смазки и на распро-

Таблица 4

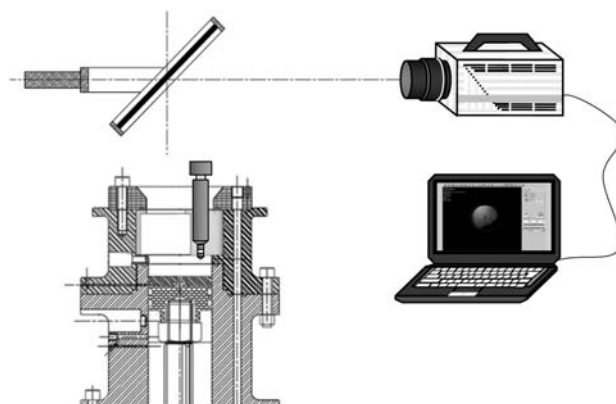
**Параметры впрыска**

Форсунка	Пьезоэлектрическая
Давление впрыска	19 МПа
Количество впрыснутого масла	0,1 мг
Момент времени	В начале цикла сжатия
Температура масла	100 °С

Таблица 6

**Характеристики высокоскоростной камеры**

Скорость съемки, кадр/с	30 000
Разрешение, пиксель	640×592



**Рис. 10. Схема высокоскоростной фотосъемки**

странение факела, при этом температура масла с помощью нагревателей подводящей трубки и форсунки задавалась в пределах от 30 до 100 °С.

Оказалось, что оба фактора — момент самовоспламенения смазки и распространение факела — от температуры почти не зависят. По-видимому, температура масла и рабочей смеси после впрыска быстро выравниваются вследствие конвективного теплообмена. В результате была выбрана температура масла перед впрыском, равная 100 °С. В ходе предварительных испытаний температура изменялась с целью нахождения оптимального диапазона, при котором самовоспламенение смазки происходит в районе ВМТ.

**Условия проведения экспериментов**

На основании результатов предварительных испытаний, описанных в предыдущем разделе, были выбраны параметры впрыска, представленные в табл. 5. Коэффициент избытка воздуха, равный 1,5 был принят как усредненное значение для всех типов газовых двигателей, работающих на рабочей смеси различного состава — от стехиометрической до бедной.

Чтобы выявить влияние ВМЕР на самовоспламенение смазочного масла, была проведена серия экспериментов с разным значением давления в цилиндре при нахождении поршня в ВМТ, при постоянном значении коэффициента избытка воздуха.

В реальном двигателе значения давления в цилиндре при нахождении поршня в ВМТ 2,5, 3,0 и 3,5 МПа, приведенные в табл. 5, возникают при ВМЕР, равном 1,1, 1,3 и 1,5 МПа соответственно, при значении коэффициента избытка воздуха 1,5. Это ниже, чем в газовых двигателях, работающих на бытовом газе, о которых упоминалось ранее (см. раздел, посвященный влиянию ВМЕР на LOP). Однако дальнейшее повышение давления в цилиндре становится проблематичным, если учесть прочностные характеристики RCM.

Топливный газ состоит из двух компонентов — метана и пропана. Метановое число подбирается с помощью изменения соотношения этих компонентов, и рассчитывается по методике AVL. Для каждого сочетания условий эксперимента исходная температура смеси на момент начала такта сжатия постепенно увеличивалась, при этом фиксировался момент начала самовоспламенения смазки.

Таблица 5

**Параметры впрыска**

Коэффициент избытка воздуха	1,5
Давление в цилиндре в ВМТ, МПа	2,5, 3,0, 3,5
Метановое число	60, 70, 100
Газовое топливо	Метан и пропан

**Метод расчета**

Задержка самовоспламенения при различных сочетаниях параметров оценивалась как зависимость момента самовоспламенения от степени сжатия, при разных исходных температурах смеси.

Задержка самовоспламенения определяется как промежуток времени между моментами достижения поршнем ВМТ и самовоспламенения смазки  $T_{id} = T_{ig} - T_{ВМТ}$ .

Начало самовоспламенения смазки определяется как временной интервал, после которого ROHR (скорость тепловыделения) начинает расти. Для большей надежности используются данные визуализации процесса самовоспламенения смазки с помощью высокоскоростной камеры. Характеристики высокоскоростной камеры приведены соответственно в табл. 6 и на рис. 10.

**Результаты экспериментов**

Результаты сравнения задержки самовоспламенения при различных значениях давления в цилиндре при нахождении поршня в ВМТ — 2,5, 3,0 и 3,5 — при значении метанового числа 70 показаны на рис. 11. Соответствующие измерения проводились при одном и том же значении коэффициента избытка воздуха 1,5. Сравнение с аналогичными данными при других значениях давления в цилиндре покажет влияние ВМЕР на самовоспламенение масла.

При скорости двигателя 1000 об/мин интервал времени 10 мс соответствует углу ПКВ 60°. При этом температура сжатия с задержкой самовоспламенения в 10 мс используется как пороговое значение самовоспламенения масла для среднеоборотных газовых двигателей, учитывая, что длительность горения (по углу) обычно составляет от 30 до 40 °ПКВ.



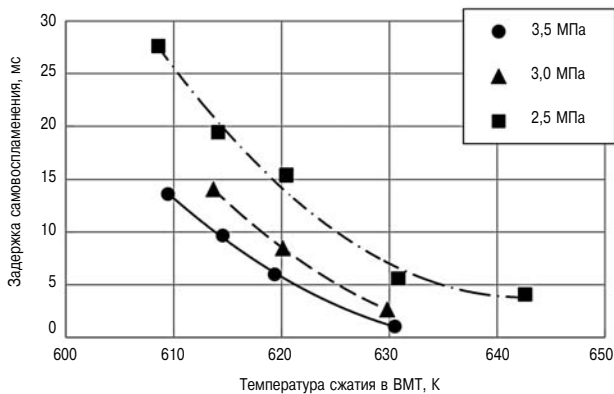


Рис. 11. Влияние давления в цилиндре

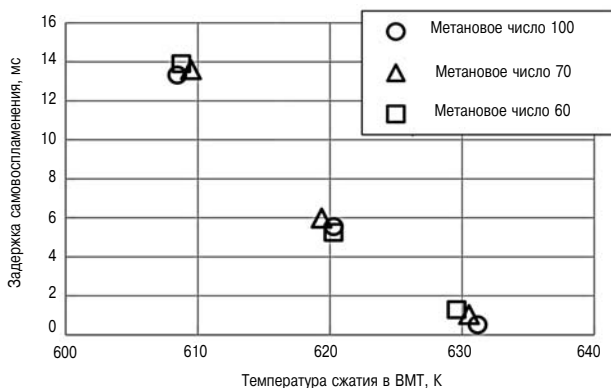


Рис. 12. Влияние метанового числа

На рис. 11 разница температур сжатия на границе самовоспламенения масла (с задержкой самовоспламенения 10 мс) при разнице давления в цилиндре в ВМТ 40 % (3,5/2,5 МПа) составляет порядка 10 К.

Это равносильно изменению температуры 2,5 К при 10-процентном изменении давления в цилиндре, и гораздо меньше, чем разность температур сжатия 30 К на границе LOP, приведенная в табл. 1. Отсюда следует вывод о доминирующем влиянии ВМЕР на LOP во второй фазе (распространение пламени после самовоспламенения масла).

На рис. 12 показаны результаты сравнения значений задержки самовоспламенения при разных значениях метанового числа, при давлении в цилиндре 3,5 МПа в момент нахождения поршня в ВМТ.

Эти данные получены в ходе измерений при значении коэффициента избытка воздуха 1,5. Из рис. 12 видно, что значения задержки самовоспламенения при разных значениях метанового числа во всем диапазоне температур почти одинаковы.

Отсюда можно сделать вывод, что уменьшение температуры сжатия на границе LOP объясняется почти исключительно влиянием метанового чис-

ла на распространение пламени после самовоспламенения масла (фаза 1).

### Заключение

В ходе настоящего исследования удалось проанализировать и численно оценить эффект LOP, наблюдаемый как на серийных, так и на опытных двигателях, и влияние на его развитие таких факторов, как ВМЕР и метановое число.

Увеличение ВМЕР и уменьшение метанового числа на 10 % оказывают почти одинаковое влияние на порог LOP, снижая соответственно температуры на 30 и 25 К. Для нейтрализации этого эффекта необходимо принимать меры, например, снизить степень сжатия более чем на единицу. Однако КПД двигателя при этом значительно упадет.

Как показали эксперименты, проведенные на машине RCM, влияние ВМЕР и метанового числа на LOP проявляется, главным образом, на этапе распространения пламени после самовоспламенения масла (фаза 2).

LOP продолжает оставаться одним из важнейших факторов, ограничивающих дальнейшее увеличение ВМЕР, в условиях, когда все большую часть рынка топлив занимает газ, метановое число которого может колебаться в широких пределах.

Для создания конкурентоспособного газового двигателя с более высоким ВМЕР при меньшем значении метанового числа понадобятся максимально эффективные меры для предотвращения LOP.

Однако пока такие технологии не найдены. Поэтому для газовых двигателей (включая двухтопливные) столь важна количественная оценка влияния на LOP различных факторов. Это позволит оптимизировать параметры двигателей таким образом, чтобы избежать развития как LOP, так и детонации.

### Условные обозначения и сокращения

EAR	Коэффициент избытка воздуха (Excess Air Ratio)
LOP	Воспламенение смеси, вызванное смазочным маслом (Lube Oil Preignition)
RCM	Машина быстрого сжатия (Rapid Compression Machine)
ROHR	Скорость тепловыделения (Rate Of Heat Release)

### Литература

1. Yasueda S. «The Abnormal Combustion caused by Lubricating oil on High BMEP Gas Engines», The Working Process of Internal Combustion Engine 2011.
2. Yasueda S. «The Abnormal Combustion Affected by Lubricating Oil Ignition in Premixed Gas Engine», ASME, ICES2012–81042.
3. Fujimoto K. «Investigations of Engine Oil Effect on Abnormal Combustion in Turbocharged Direct Injection —

Spark Ignition Engines (Second Report) — Correlation Between Auto-Ignition Temperature of Engine Oil and Low-Speed Pre-Ignition Frequency», JSAE spring conference 2012.

4. Dahnz C., Spicher U. «Irregular combustion in supercharged spark ignition engines — pre-ignition and other phenomena» International Journal of Engine Research 2010, 11:485, DOI 10.1243/14680874JER609.

5. Zhu S. «A Method for Developing countermeasures for Lubricating Oil Preignition in Natural Gas Engines», 9th Dessau Gas Engine Conference, 2015.

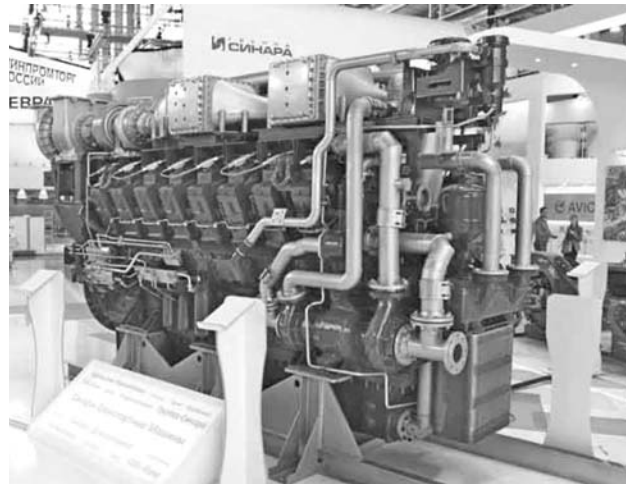
6. Yasueda S. «The Technical Challenges of Gas Engines for LNG Fueled Ships», ISME KOBE, 2011.

7. Yasueda S. «The investigation of the unstable combustion caused by the autoignition of lubricatingoil in premixed gas engine», 8th Dessau Gas Engine Conference, 2013.

8. Yasueda S. «Predicting Autoignition caused by Lubricating Oil in Gas Engines», CIMAC 2013, Paper № 37.

9. Yasueda S. «The investigation of the abnormal combustion by lubricating oil with the advanced CFD simulation», The Working Process of Internal Combustion Engine 2015.

«СИНАРА-ТРАНСПОРТНЫЕ МАШИНЫ» И РЖД ДОГОВОРИЛИСЬ О ПОСТАВКЕ 200 ТЕПЛОВЗОВОВ 2ТЭ35А



Холдинг «Синара-Транспортные Машины» и ОАО РЖД договорились о поставке магистральных грузовых двухсекционных тепловозов 2ТЭ35А с асинхронным тяговым приводом с оказанием услуг по их последующему сервисному обслуживанию и ремонту в период жизненного цикла. Параметры сделки предусматривают производство и поставку 200 тепловозов 2ТЭ35А на период до 2031 г. и строительство инфраструктуры для сервисного обслуживания на территории эксплуатации локомотивов — Дальневосточной и Восточно-Сибирской железных дорогах.

«Поставка РЖД уникальных российских тепловозов 2ТЭ35А — это значимый шаг в развитии отечественного железнодорожного машиностроения. Мы выходим в новый для себя сегмент — рынок магистрального тепловозостроения, а наш стратегический партнер РЖД получает надежное решение в виде современной техники, которая, в том числе, обеспечит рост провозной способности Восточного полигона, — прокомментировал заместитель генерального директора по продажам СТМ — генеральный директор Торгового дома СТМ Антон Зубихин. — Особо подчеркну, что данный локомотив имеет серьезный потенциал продаж на рынке «пространства колеи 1520», а встроенные в него энергетические установки соответствуют самым передовым международным стандартам и параметрам экологичности».

Планируется, что первые два локомотива 2ТЭ35А поступят на сеть РЖД в опытную эксплуатацию в 2022 г. Серийное производство 2ТЭ35А будет осуществляться на заводе «Уральские локомотивы».

Двухсекционный 16-осный магистральный грузовый тепловоз 2ТЭ35А — абсолютно новый локомотив, в котором заново разрабатывается практически каждый

компонент в широкой кооперационной цепочке российских предприятий, в том числе двигатель 16ДМ-185Т — его серийное производство будет организовано на Уральском дизель-моторном заводе.

Семейство двигателей нового поколения ДМ-185 разработано в рамках реализации решений Федеральной целевой программы «Национальная технологическая база РФ». Новое семейство двигателей планируется к применению в кораблестроении и судостроении, локомотивостроении, карьерной технике и объектах малой энергетики.

В 2ТЭ35А предусмотрены две энергетические установки мощностью 3650 кВт каждая. Они соответствуют экологическим требованиям Stage IIIA ЕС.

Благодаря установленному на тепловоз асинхронному тяговому двигателю ТАД430 (производства российской компании «Тяговые компоненты») он будет рассчитан на вождение тяжеловесных поездов массой до 7100 тонн.

2ТЭ35А разработан Научно-исследовательским центром СТМ по техническому заданию ОАО РЖД и в соответствии с долгосрочной программой развития холдинга до 2025 г., предусматривающей применение подвижного состава с улучшенными тяговыми характеристиками и увеличенными межремонтными интервалами.

Напомним, в ноябре 2020 г. ОАО РЖД и АО СТМ заключили соглашение о сотрудничестве в сфере производства, испытаний, поставки и сервисного обслуживания в период жизненного цикла магистральных грузовых 8-осных двухсекционных электровозов постоянного тока с асинхронным тяговым приводом 2ЭС6А и магистральных грузовых двухсекционных тепловозов с асинхронным тяговым приводом 2ТЭ35А.

<https://sinaratm.ru>

УДК 62.43

Шипов В.Б. АО «РУМО» возрождает производство поршневых ДВС и газомотокомпрессоров // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 3–4.

**Ключевые слова:** АО «РУМО», конструкторско-техническая документация, патенты, товарные знаки, производство, газомотокомпрессоры (ГМК), поршневые ДВС.

В 2019 г. в процессе реорганизации завода «РУМО» (ранее «Двигатель революции») было создано новое предприятие АО «РУМО» в целях выполнения функций центра комплексных инженеринговых решений для нефтегазовой, энергетической и судовой отраслей. АО «РУМО» приобрело права на всю интеллектуальную собственность предшественника, включая конструкторско-техническую документацию, патенты, товарные знаки «РУМО» и «Двигатель революции». Новое предприятие уже возобновило производство полнокомплектных газомотокомпрессоров агрегатной мощностью 16 и 25 МВт и готовит к выпуску двигатели универсального применения типоразмерного ряда ЧН22/28 в дизельном и газопоршневом вариантах мощностью 800 и 1000 кВт при частоте вращения 750 и 1000 об/мин. Ил. 4.

УДК 621.43.01

Абызов О.В., Галышев Ю.В., Метелев А.А., Алексеев Д.Г. Разработка и верификация модели пузырькового кипения в рубашке охлаждения головки цилиндра двигателя внутреннего сгорания // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 5–10.

**Ключевые слова:** головка цилиндра, охлаждение, пузырьковое кипение, усиление конвективного теплообмена, математическая модель, верификация. Поверхностное пузырьковое кипение в каналах жидкостного охлаждения головки цилиндра ДВС сопровождается усилением теплоотвода от стенки в охлаждающую жидкость. Известные эмпирические модели кипения (например, модель Дж. Чена) в ряде случаев демонстрируют занижение расчетного коэффициента теплоотдачи. В предлагаемой модели сформулирован и математически описан механизм усиления конвективного теплообмена при кипении, основанный на аналогии «пузырьковой» и физической шероховатости стенки. Модель реализована в виде программного CFD-кода, верифицирована по данным эксперимента на оригинальном тепловом безмоторном стенде, не требующая вычислительных ресурсов, что позволяет применять ее в инженерных компьютерных расчетах сопряженного теплообмена в головках и блоках цилиндров ДВС. Табл. 1. Ил. 6. Библ. 17 назв.

УДК 621.436

Обозов А.А., Матюхина А.А. Оптимизация формы камеры сгорания дизельного двигателя с учетом процесса развития топливного факела // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 11–14.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, впрыскивание топлива, развитие топливного факела, форма камеры сгорания, оптимизация. Приводится описание программы, разработанной в среде программирования MS EXCEL, позволяющей анализировать процесс развития топливного факела в камере сгорания дизеля в целях оптимизации формы камеры сгорания. Описываются приемы динамического «анимационного» представления графической информации, получаемой на основании результатов расчетов. Приводятся результаты расчета динамики топливного факела дизельного двигателя Д-240 (ММЗ), в основу которого положена «капельная теория» развития факела в объеме камеры сгорания. Ил. 4. Библ. 6 назв.

УДК 621.437

Федянов Е.А., Левин Ю.В., Шумский С.Н. Влияние малых добавок водорода на показатели роторно-поршневого двигателя, работающего на обедненных топливовоздушных смесях // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 15–19.

**Ключевые слова:** двигатель Ванкеля, несгоревшие углеводороды, оксид углерода, удельный расход топлива, добавка водорода, бензин, бедная топливовоздушная смесь.

Использование добавок свободного водорода к основному топливу в роторно-поршневых двигателях Ванкеля является эффективным способом решения проблемы неполного сгорания топливовоздушной смеси, свойственной этим двигателям. Приведены результаты исследования по организации рабочего процесса двигателя Ванкеля с использованием водородосодержащих добавок к основному топливу. Показано, что добавка свободного водорода к основному топливу позволяет уменьшить величину удельного эффективного расхода топлива и снизить содержание в отработавших газах несгоревших углеводородов и оксида углерода при сгорании обедненной топливовоздушной смеси. Так, например, добавка небольших (до 5 %) порций водорода к основной топливовоздушной смеси обеспечивает устойчивую работу роторного двигателя Ванкеля при значении коэффициента избытка воздуха равном 1,3. Ил. 5. Библ. 9 назв.

УДК 621.436

Кузнецов А.Г., Харитонов С.В., Рыжов В.А. Разработка и исследование системы управления дизельным двигателем // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 20–25.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, система управления, адаптивный электронный блок управления, результаты экспериментального исследования.

Рассмотрены вопросы разработки и исследования комплексной адаптивной системы управления дизельными двигателями. Комплексный подход к управлению предусматривает формирование регулирующих воздействий не только на процесс топливоподачи, но и на другие системы двигателя. Адаптивность предусматривает гибкую перенастройку системы управления на различных режимах работы двигателя. Принята концепция построения электронного блока управления в виде двух модулей: универсального процессорного модуля и специализированного модуля, ориентированного на конкретный тип двигателя. Изготовлен экспериментальный образец электронного блока для перспективного дизельного двигателя размерности  $D/S = 6,5/31$  производства АО «Коломенский завод». Работоспособность разработанного электронного блока подтверждена результатами

экспериментального исследования системы управления на одноцилиндровом отсеке двигателя. Ил. 5. Библ. 9 назв.

УДК 621.436-726

Абрамов П.В. Фазовый регулятор состава смеси для одноцилиндрового двигателя // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 26–30.

**Ключевые слова:** одноцилиндровый двигатель, гармонический анализ, регулятор состава смеси, фаза гармоник кинетической энергии, процедура регулирования.

Предложен способ регулирования состава смеси одноцилиндрового двигателя, основанный на гармоническом анализе приведенной к оси коленчатого вала кинетической энергии подвижных элементов двигателя и жестко связанного с коленчатым валом потребителя. Приведены результаты экспериментов по выявлению реакции регулятора состава смеси по фазе основной гармоник кинетической энергии (коррелирующей с составом смеси) на возмущение, вызванное изменением в дозировании топлива. Установлена связь между тепловым состоянием двигателя и параметрами гармоник кинетической энергии. Предложен способ коррекции поддерживаемого регулятором значения фазы основной гармоник кинетической энергии в процессе прогрета двигателя для уменьшения отклонения фактического состава смеси от заданного. Описаны особенности процедуры перехода к регулированию. Ил. 6. Библ. 2 назв.

УДК 629.113.6

Лобанов И.И., Калугин С.П. Процесс пуска дизеля как источник диагностической информации // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 31–35.

**Ключевые слова:** дизель, цилиндро-поршневая группа, измерение компрессии, методы диагностики, процесс пуска дизеля, дроссельные потери.

Предложен метод диагностики дизельных двигателей, позволяющий оценивать качество компрессии (по всем цилиндрам суммарно) без применения специального оборудования. При испытаниях суперконденсаторной системы пуска дизеля с отключенной подачей топлива была установлена зависимость затрат энергии на прокрутку коленчатого вала, вызванных дроссельными потерями, от числа открытых индикаторных кранов и температурного состояния дизеля. При равном запасе энергии в суперконденсаторах открытие индикаторных кранов снижает число оборотов коленчатого вала, что может стать диагностическим параметром неплотности поршневых колец, выпускных и выпускных клапанов и газового стыка. Точность метода может оцениваться минимальной величиной утечки, вызванной открытием половины проходного сечения одного индикаторного крана. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 7 назв.

УДК 621.43

Смазочные масла для поршневых ДВС (по материалам конгресса CIMAC) // Двигателестроение. — 2021. — № 2. — С. 36–53.

**Ключевые слова:** поршневой двигатель, форсирование, степень сжатия, смазочное масло, моторные испытания, воспламенение смазки, газовое топливо, метановое число.

Среди технологий, ориентированных на дальнейшее повышение КПД двигателей и одновременное снижение вредных выбросов, наиболее известны цикл Миллера, повышение степени сжатия, а также применение двухтопливных и многотопливных двигателей. В то же время форсировка двигателей ускоряет деградацию смазочного масла и сокращает срок его службы из-за быстрого снижения щелочного числа и увеличения вязкости. Можно ожидать, что все эти факторы ускорят создание новых масел, предназначенных для поршневых тронковых среднеоборотных двигателей, учитывая, как предлагаемым сегодня на рынке сортам масел уже больше десяти лет. В докладе компании "Shell Global Solution" подчеркивается важность использования новых методов моторных испытаний масел, помимо традиционных методик, и уточняется корреляция между их качеством и методами испытаний. Рассматриваются некоторые аспекты использования опытного одноцилиндрового отсека, работающего на мазуте, с целью демонстрации влияния качества моторного масла на его характеристики. Данный инструмент полезен также для сравнительной оценки эффективности способов улучшения показателей масла, например таких, как чистота двигателя, контроль вязкости масла и снижение запаса его щелочности. Рассматриваются также усовершенствованные программы испытаний и системы управления опытного дизеля Caterpillar-AVL фирмы "Shell", чтобы показать, как данный инструмент может быть использован для получения надежных и повторяемых результатов испытаний, проводимых с целью исследований и сертификации.

В совместном докладе компаний "GDEC Inc." и "TOTAL" приведены результаты фундаментального исследования с использованием машины быстрого сжатия (RCM - Rapid Compression Machine), предпринятого с целью изучения влияния характеристик масла на период задержки воспламенения для смазочных масел различного состава при разных внешних условиях. Преждевременное воспламенение смеси, вызванное смазочным маслом - феномен, который становится все более очевидным по мере увеличения среднего эффективного давления двигателей до уровня 1,8 МПа и более. Процесс сопровождается резким ростом максимального давления в цилиндре, способным вывести двигатель из строя. Данный феномен может стать препятствием для дальнейшего совершенствования двигателей в направлении повышения КПД, поскольку это неразрывно связано с увеличением степени сжатия и среднего эффективного давления. Ожидается, что по мере расширения использования в газовых двигателях LNG, упомянутый эффект также может проявиться в судовых установках, где метановое число изменяется в широких пределах в зависимости от уровня топливного газа в танках. Опыт эксплуатации и стендовых испытаний, показывая, что преждевременное воспламенение смеси является сложным явлением, зависящим от множества факторов, таких, как температура сжатия, коэффициент избытка воздуха, метановое число топливного газа, среднее эффективное давление, при этом численных оценок до сих пор не проводилось. Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником. Табл. 9. Ил. 34. Библ. 12 назв.

UDC 62.43

**Shipov V.B. JSC «RUMO» to revive production of reciprocating engines and gas-engine-compressor units** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 3–4.

**Keywords:** JSC RUMO, design documentation, patents, trademark, gas-engine-compressor unit, production, reciprocating engine.

Reorganization of «RUMO» Works (earlier known as «Dvigatel Revolutsii») in 2019 resulted in the establishment of a new enterprise JSC «RUMO» as a Competency Center, expected to provide new engineering solutions and products for oil-and-gas, energy and shipbuilding industrial sectors. JSC «RUMO» acquired all the intellectual property rights from its antecedent, including design documentation, patents, trademarks «RUMO» Works and «Dvigatel Revolutsii». The new enterprise has already revived production of gas-engine-compressor units rated at 16 and 25 MW, and is preparing production of new line of multi-purpose diesel and gas engines rated at 800 and 1000 kW & 750 and 1000 rpm respectively. 4 ill.

UDC 621.43.01

**Abyzov O.V., Galyshev Yu.V., Metelev A.A. and Alexeev D.G. Development and verification of the model of bubble boiling in diesel engine jacket passage** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 5–10.

**Keywords:** cylinder head, cooling, bubble boiling, intensification of convection heat exchange, mathematical model, verification.

Surface bubble boiling in diesel engine jacket passage enhances heat removal from engine jacket wall to coolant. Typical to most of known empiric models of boiling (e. g., that offered by J.Chen) is underestimation of design heat-transfer coefficient. The model offered herein is based on the mechanism of enhancement of convection heat exchange during boiling, making use of similarity between «vesicular» and physical roughness of engine jacket wall. The model is implemented as CFD-code and verified by the experiment carried out on original motorless heat-transfer test stand. The model in question is not demanding in terms of needed computing power, which enables its use in analyses of conjugate heat exchange in engine cylinder locks and heads. 1 table, 6 ill., 17 ref.

UDC 621.436

**Obozov A.A. and Matyukhina A.A. Optimization of combustion chamber geometry taking account of fuel jet evolvement** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 11–14.

**Keywords:** reciprocating engine, fuel injection, fuel jet evolvement combustion chamber geometry, optimization.

The authors' application developed in programming environment MS EXCEL enables analysis of fuel jet evolvement in engine combustion chamber with a view to optimize its geometry. Described are the methods of dynamic «animated» presentation of graphic information based on calculation results. The method in question makes use of liquid drop model. The authors provide the results of fuel jet evolvement calculations as applied to type Д-240 (MM3) diesel engine. 4 ill., 6 ref.

UDC 621.437

**Fedyanov Ye.A., Levin Yu.V. and Shumsky S.N. Addition of small amount of hydrogen as a means to improve performance of pistonless rotary engine firing lean air-fuel mixture** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 15–19.

**Keywords:** Wankel engine, unburned hydrocarbons, carbon oxide, specific fuel consumption, hydrogen addition, petrol, lean air-fuel mixture.

One of the capital drawbacks of Wankel engines is imperfect combustion of air-fuel mixture, which, however, may be prevented with adding free hydrogen to the main fuel. The authors cite the results of their experiments with hydrogenated fuel. Adding free hydrogen to the main fuel results in higher fuel efficiency and lower percentage of unburned hydrocarbons and carbon oxides in exhaust gas when firing lean fuel mixture. Thus, adding small (up to 5 %) doses of hydrogen to the main fuel secures stable Wankel engine operation at  $\lambda = 1,3$ . 5 ill., 9 ref.

UDC 621.436

**Kuznetsov A.G., Kharitonov S.V. and Ryzhov V.A. Development and examination of diesel engine control system** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 20–25.

**Keywords:** diesel engine, control system, adaptive electronic control unit, results of experiments.

Comprehensive approach to engine operation management implies not only control of fuel supply, but also control over other engine systems. Adaptivity means flexible control system adjustment under varying engine operating conditions. Electronic control unit consists of two modules: universal processor module and a dedicated module designed for a particular engine type. Prototype electronic unit for new Kolomzavod engine type 26,5/31 has been manufactured. Its performance characteristics have been verified by tests on a single-cylinder laboratory engine. 5 ill., 9 ref.

UDC 621.436-726

**Abramov P.V. Phase regulator of combustible mixture composition for a single-cylinder engine** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 26–30.

**Keywords:** single-cylinder engine, harmonic analysis, combustible mixture composition regulator, phase of kinetic energy harmonic, governing procedure.

The author offered a method of control of combustible mixture composition, based on harmonic analysis of kinetic energy of moving parts of the engine and rigidly coupled load. Correlation between combustible mixture composition and phase of kinetic energy fundamental harmonic is evaluated. Also evaluated is correlation between engine temperature and kinetic energy harmonic parameters. A method is offered to correct kinetic energy fundamental harmonic phase during engine warm-up time, so as to minimize deviation of actual mixture composition from its set level. 6 ill., 2 ref.

UDC 629.113.6

**Lobanov I.I. and Kalugin S.P. Start procedure as a means of engine diagnostics** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 31–35.

**Keywords:** diesel engine, crank assembly, compression measurement, diagnostic methods, engine starting procedure, pumping losses.

An engine diagnostic method is offered, which enables evaluation of compression quality (total for all the cylinders) with no special measurement instrumentation. Tests of ultracapacitor-based engine starting system, with disabled fuel injection, has been carried out to determine dependence of pumping losses on number of opened indicator cocks and engine temperature. Energy content in the ultracapacitors being constant, opening indicator cocks results in lower cranking speed, which may be a sign of leakage through piston rings, inlet and outlet valves, or cylinder head/block interface. Accuracy of the method may be estimated as a minimum flow through of one half-opened indicator cock. 1 table, 4 ill., 7 ref.

UDC 621.43

**Lube oils for reciprocating engines (based on CIMAC Congress papers)** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 36–53.

**Keywords:** reciprocating engine, boost, compression rate, lube oil, motor stand tests, lube oil ignition, gaseous fuel, methane number.

Tightening emissions controls, efficiency and fuel flexibility are driving engine technology evolution to satisfy increasingly demanding market needs and regulations. To address these requirements, well established concepts like miller timing, increased compression ratios and dual or multi-fuel engine designs continue to expand to medium speed engines applications. For engine oils used in these applications, all these approaches have resulted in exposure to higher oil stresses that accelerate oil degradation which is reflected in reduced oil service life as condemnation limits are reached faster particularly in terms of base number depletion and lubricant viscosity increase. Facing these challenges, it is expected that commercial trunk piston engine oil (TPEO) technologies are undergoing the next development cycle, as more demanding applications penetrate the market and most of current lubricant products have been available for over a decade. The paper presented by Shell Global Solution highlights the increasing relevance of using engine testing tools on top of traditional approaches to develop TPEOs and challenge some bench testing and performance relationships. Improved test protocols and engine control systems for Shell's Caterpillar-AVL test engine (1-cylinder AVL diesel engine LEF model with a Caterpillar 1Y540 top construction) will be presented to show how this tool can be utilized to generate reliable and repeatable test data for discovery and benchmarking purposes, highlighting discrimination for high performance candidate formulations to prove their robustness and readiness for further testing in full size engines such as Shell's Wartsila 4L20D as well as field engines running under conditions capable to discriminate the performance of a lubricant.

UDC 621.43

**Lube oils for reciprocating engines (based on CIMAC Congress papers)** // Dvigatlestroyeniye. — 2021. — № 2. — Pp. 36–53.

**Keywords:** reciprocating engine, boost, compression rate, lube oil, motor stand tests, lube oil ignition, gaseous fuel, methane number.

Tightening emissions controls, efficiency and fuel flexibility are driving engine technology evolution to satisfy increasingly demanding market needs and regulations. To address these requirements, well established concepts like miller timing, increased compression ratios and dual or multi-fuel engine designs continue to expand to medium speed engines applications. For engine oils used in these applications, all these approaches have resulted in exposure to higher oil stresses that accelerate oil degradation which is reflected in reduced oil service life as condemnation limits are reached faster particularly in terms of base number depletion and lubricant viscosity increase. Facing these challenges, it is expected that commercial trunk piston engine oil (TPEO) technologies are undergoing the next development cycle, as more demanding applications penetrate the market and most of current lubricant products have been available for over a decade. The paper presented by Shell Global Solution highlights the increasing relevance of using engine testing tools on top of traditional approaches to develop TPEOs and challenge some bench testing and performance relationships. Improved test protocols and engine control systems for Shell's Caterpillar-AVL test engine (1-cylinder AVL diesel engine LEF model with a Caterpillar 1Y540 top construction) will be presented to show how this tool can be utilized to generate reliable and repeatable test data for discovery and benchmarking purposes, highlighting discrimination for high performance candidate formulations to prove their robustness and readiness for further testing in full size engines such as Shell's Wartsila 4L20D as well as field engines running under conditions capable to discriminate the performance of a lubricant.

The paper presented by GDEC Inc. and TOTAL describes the results of the fundamental research with a Rapid Compression Machine (RCM) was conducted. Using the RCM, the ignition delay of the lubricating oils with different formulation was measured with various ambient conditions to investigate the effect of the characteristics of the oil. After this fundamental test, the single cylinder test under the similar conditions as commercial engines is scheduled as the next step of the research to confirm the validity of the results of RCM test. This phenomenon could be the impediment to the improvement of the engine efficiency and the increase of mean effective pressure in the future development of engines because it becomes severer by increasing compression ratio and mean effective pressure. In consideration of the fact that this phenomenon is much more apparent on the industrial gas engines in Japanese market where the city gas with very low Methane Number is used, it is expected that this issue will be more common when LNG with the wide range of Methane Number will be used as the fuel of gas engines all over the world from now, especially in the marine application where Methane Number changes also depending on the tank level. Through the experiences on many production engines and the test engines, it has been found that this kind of preignition is the complicated phenomenon affected by many contributing factors such as the compression temperature, lambda of mixture, Methane Number of fuel gas, mean effective pressure and so on. But the contribution of each factor has not been clarified quantitatively yet.

The original paper is translated into Russian by G.Melnik, PhD. 9 tables, 34 ill., 12 ref.

## Вниманию авторов

Редакция обращает внимание авторов на тематическую направленность принимаемых к рассмотрению рукописей и необходимость выполнения требований по их оформлению.

Журнал «Двигателестроение» является ежеквартальным научно-техническим изданием, посвященным проблемам развития, проектирования, изготовления и эксплуатации поршневых двигателей.

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

- расчеты, конструирование, исследования двигателей;
- системы и агрегаты двигателей;
- конструкционные материалы;
- топливо и смазочные материалы, присадки;
- ресурсосбережение;
- эксплуатация и ремонт двигателей;
- автоматизация и диагностирование;
- проблемы экологии;
- гипотезы и дискуссии;
- история развития конструкций (проектов), предприятий и науки о двигателях;
- обзорная и справочная информация.

Текст рукописи должен быть представлен в двух экземплярах на бумаге формата А4, гарнитура Times New Roman 12, через полтора интервала, с обязательным приложением электронной версии на CD (в формате Microsoft Word 2000/2003), полностью соответствующей оригиналу на бумаге. Формулы в электронной версии должны быть набраны с использованием редактора формул Microsoft Equation 3.0. За достоверность набора формул несет ответственность автор. При использовании в наборе специальных шрифтов последние прилагаются в электронном виде. Электронные копии иллюстраций представляются отдельными файлами в форматах: TIF, JPG (не менее 300 dpi, черно-белые полутоновые изображения).

Представляя рукопись статьи в редакцию, автор должен сообщить о ее предыдущих публикациях.

Рукопись статьи должна иметь рекомендацию к публикации в журнале (направление) от организации, где выполнялась работа, а также акт экспертной комиссии с указанием того, что рукопись не содержит сведений, запрещенных к публикации в открытой печати.

Заглавие статьи должно быть кратким (не более 120 знаков), точно отражающим ее содержание.

Для оперативного решения вопросов, связанных с подготовкой рукописи к публикации, а также для размещения электронной версии журнала в НЭБ должны быть представлены сведения об авторах:

- фамилия, имя, отчество (полностью);
- ученая степень и звание;
- полное наименование места работы;
- полный почтовый адрес;
- действующие контактные телефоны, e-mail).

Для представления авторов читателям желательно присылать цветные или черно-белые фотографии авторов размером не менее чем 3×4 см. Допускаются электронные копии в форматах TIF или JPG.

Обязательными приложениями к рукописи являются: реферат, в котором четко и сжато изложены основные цели и результаты работы объемом от 700 до 1200 знаков; код УДК; ключевые слова.

Заглавие статьи, название организаций, ФИО авторов, ключевые слова и реферат необходимо присылать на русском и английском языках.

Объем статьи не должен превышать 25 тыс. знаков, включая таблицы и список литературы. Иллюстрации в виде графиков, диаграмм, схем и фотографий оформляются в виде приложений к тексту рукописи. Все приложения к тексту рукописи представляются на отдельных листах, а в электронной копии — в виде отдельных файлов. Формулы, иллюстрации и таблицы должны быть пронумерованы в порядке упоминания и снабжены поясняющими (подрисовочными) подписями. Все обозначения на иллюстрациях должны быть объяснены (расшифрованы) в тексте или в подрисовочных подписях и соответствовать обозначениям в тексте.

Даже если все иллюстрации заверстаны автором в текст электронной копии рукописи, то их представление в виде отдельных файлов и распечаток на отдельном листе обязательно.

В статьях желательно приводить только те математические формулы, которые необходимы для понимания сущности вопроса, исключая их подробные выводы.

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

При написании формул необходимо использовать общепринятые обозначения физических величин по Международной системе единиц (ГОСТ 8.417–2002. Государственная система обеспечения единства измерений. Единицы величин). Ссылки на цитируемые источники необходимо оформлять в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 05–2008.

Если представленные в редакцию рукописи не удовлетворяют перечисленным требованиям, то они могут быть доработаны по согласованию с автором сотрудниками редакции. Услуги редакции по доработке рукописей статей платные.

Рукописи статей, поступившие в редакцию, рецензируются специалистами. Если у рецензента имеются обоснованные критические замечания, статья возвращается автору на доработку.

Редакция оставляет за собой право внесения в текст редакторских изменений, не искажающих смысла авторского текста. При поступлении в редакцию обоснованных критических замечаний, касающихся размещенного в журнале материала, редакция оставляет за собой право на их публикацию в порядке дискуссии.

Авторское право на конкретную статью принадлежит авторам. Ответственность за содержание статьи несет также автор. При перепечатке статьи или ее части ссылка на журнал обязательна.

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

*Редакция журнала*

**Уважаемые читатели журнала!**

**На журнал «Двигателестроение»**

**можно подписаться:**

**в почтовых отделениях связи**

**по каталогу агентства:**

**«ПРЕССА РОССИИ»**

**Подписной индекс**

**журнала**

**«Двигателестроение» —**

**70259**



**Подписаться на журнал можно и в редакции.**

**Срок подписки на журнал**

**«Двигателестроение»**

**в редакции не ограничен.**

**Для оформления подписки**

**в редакции необходимо**

**отправить заявку**

**по e-mail: [ecology@rdiesel.ru](mailto:ecology@rdiesel.ru)**

**Почтовый адрес редакции:**

**190020, Санкт-Петербург, а/я 9**

**Телефон редакции: +7 (812) 719-73-30**

**В редакции можно заказать ранее вышедшие номера журнала**

**[www.rdiesel.ru](http://www.rdiesel.ru)**



РУМО



Экология НПФ

ДВИГАТЕЛЕ  
СТРОЕНИЕ

190020  
Санкт-Петербург, а/я 9  
Тел.: +7(812)719-73-30  
e-mail: [ecology@rdiesel.ru](mailto:ecology@rdiesel.ru)  
[www.rdiesel.ru](http://www.rdiesel.ru)