

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ НА КОНГРЕССЕ СИМАС 2007

Материал подготовил к.т.н. Г.В. Мельник

РАЗРАБОТКА НОВОГО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА КРУПНЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Серьезным препятствием для дальнейшего развития и применения математических моделей рабочего процесса в крупных дизелях на основе методов вычислительной гидродинамики является недостаток фактических данных по характеристикам распыливания, сгорания и состава отработавших газов в условиях работы, характерных для данного класса двигателей. В частности, наиболее распространенные модели рабочего процесса были разработаны для относительно небольших высокооборотных двигателей, работающих на качественных топливах. Данные для оценки адекватности таких моделей, как правило, представляют собой результаты базисных экспериментов, проводимых на камерах сгорания малого объема, а условия впрыска и горения топлива весьма далеки от тех, которые свойственны крупным судовым дизелям. Кроме того, по результатам таких экспериментов трудно судить об особенностях работы двигателя на тяжелых топливах, что типично для судовых условий.

Эти обстоятельства стали причиной принятия решения о начале разработки новой исследовательской установки с камерой сгорания в рамках международной научной программы HERCULES. Новая установка должна обеспечить возможность оптического контроля газовых потоков, процесса сгорания и формирования вредных компонентов ОГ в условиях, типичных для крупных двухтактных судовых дизелей. В частности, должны быть обеспечены реалистичные уровни давлений, температур и завихрений, а форсунки должны быть расположены так, чтобы можно было изучать взаимодействие факелов из разных форсунок. Кроме того, должна существовать возможность использования самых разнообразных видов топлив.

На основании перечисленных требований была разработана установка с круглой камерой сгорания постоянного объема и размерами, типичными для крупных судовых дизелей. В стенках камеры имеются окна, расположение которых обеспечивает обзор практически всех элементов объема камеры, представляющих интерес для исследования. Через наклонные каналы в камеру поступает нагретый газ под давлением, что позволяет воспроизвести реальные термогидравлические условия в момент начала подачи топлива. Газ (воздух или азот) поступает из

аккумуляторной системы, соединенной с регенератором, который состоит из множества ячеек с электроподогревом. Предусмотрена возможность установки в камеру различных по числу и расположению комбинаций форсунок, что позволяет моделировать характерные для двухтактных двигателей конфигурации топливных струй с учетом эффекта их взаимодействия. Топливная система приспособлена для работы как на легких, так и на тяжелых сортах топлива.

Форма и размеры основных компонентов установки выбирались по результатам математического моделирования с учетом термогидравлических условий, а также требований прочности и безопасности.

В результате впервые была создана опытная установка, позволяющая исследовать рабочий процесс крупного судового дизеля в условиях, приближенных к реальным, которая может использоваться не только для оценки адекватности математических моделей, но и для оптимизации конструктивных параметров существующих и вновь проектируемых двигателей. Эта уникальная особенность дает возможность принять установку в качестве базовой для исследований в данной области.

Правильность выбранной концепции была подтверждена моделированием механических и теплогидравлических характеристик стенда.

Главное достоинство нового стенда — его универсальность. Он не только обеспечивает возможность использования широкого диапазона граничных и начальных условий как в проектных, так и в поверочных целях, но и способен работать практически на всех видах топлив. Более того, стенд, хотя он изначально проектировался для моделирования процессов в двухтактных двигателях, легко может быть приспособлен для моделирования процессов четырехтактных двигателей; для этого достаточно поменять поршень и крышку цилиндра.

Kai Herrmann, Swiss Federal Institute of Technology (ETH) Zurich, Switzerland u др.

ВПРЫСК ВОДЫ В КАМЕРУ СГОРАНИЯ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ: НОВЫЕ ПОДХОДЫ

Прямой впрыск воды (ПВВ) — это метод подачи воды под высоким давлением непосредственно в камеру сгорания с помощью отдельного распылителя. ПВВ способствует не только снижению образования NO_x в камере за счет уменьшения температуры пламени, но и улучшению

процесса сгорания топлива и снижения дымности за счет дополнительной подачи воды в другой точке рабочего цикла. Доклад посвящен исследованию указанных процессов. В первом случае для снижения образования NO_x впрыск воды предшествует впрыску топлива. Во втором случае для снижения сажеобразования впрыск воды производится в более поздний момент, например, в конце фазы подачи топлива, что способствует интенсификации догорания.

Для достижения целей настоящего исследования авторы разработали специальную форсунку, где в одном корпусе размещаются две иглы — для подачи соответственно топлива и воды. Вначале было проведено численное моделирование с использованием программы KIVA в целях определения подробных характеристик впрыска. Далее было выполнено исследование влияния на процесс сгорания топлива обоих упомянутых выше способов впрыска воды — опережающего (ОПВВ) и запаздывающего (ЗПВВ). Это исследование проводилось в основном посредством скоростной визуализации топливных факелов. Получены следующие результаты.

Влияние ОПВВ

1. ОПВВ, осуществляемый с помощью двухигольной форсунки, может существенно понизить температуру пламени при условии правильного выбора угла опережения подачи воды.

2. Такой выбор может быть значительно облегчен при использовании программного пакета CFD для расчета оптимального угла опережения подачи воды.

Влияние ЗПВВ

1. Как показало экспериментальное исследование с помощью прозрачной камеры сгорания, впрыск воды в заключительной фазе подачи топлива приводил к снижению сажеобразования в фазе догорания, в полном количественном соответствии с результатами моделирования.

2. Анализ тепловыделения по результатам моделирования подтвердил факт ускорения сгорания под воздействием подаваемой воды.

3. Визуальный анализ процесса подтвердил возможность значительного снижения сажеобразования внутри факела пламени с помощью впрыска воды в заключительной фазе подачи топлива.

На рисунке в качестве примера показаны графики впрыска топлива и воды при соотно-



шении вода—топливо 65 %. На оси абсцисс указан угол ПКВ до ВМТ.

На следующем этапе предполагается получить экспериментальное подтверждение снижения дымности (или РМ) при испытаниях реального среднеоборотного дизеля. Таким образом, применение двухигольной форсунки для впрыска топлива и воды дает возможность снизить выбросы NO_x и РМ путем последовательной подачи двух порций воды в течение одного цикла сгорания.

Hiroshi Tajima, Kyushu University, Japan, и др.

МЕТОД СВЕРХСКОРОСТНОГО ИЗМЕРЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ NO В ЦИЛИНДРЕ ГЛАВНОГО СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ

При оценки эффективности метода снижения токсичности отработавших газов особое значение имеет точность измерения концентрации токсичных составляющих ОГ. Оптимизация рабочего полноразмерного процесса судового дизеля по NO_x до сих пор является весьма длительным и трудоемким процессом.

Индивидуальное устройство для измерения NO в цилиндре позволило бы оценить эффективность работы того или иного компонента двигателя (например, форсунки), при установке его только в один из цилиндров. Это дает возможность существенно сократить затраты на доводку двигателя, что особенно существенно, когда речь идет о крупных судовых двигателях.

Данная работа посвящена использованию быстродействующего хемилюминесцентного детектора со специально разработанным пробоотборником для оценки концентрации в потоке газа, выходящего через выпускное окно цилиндра многоцилиндрового судового двигателя. При этом содержание NO измерялось как функция от угла поворота коленвала на установившемся режиме и в переходных процессах. На специальном стенде, созданном для оптимизации параметров пробоотборника и измерительной системы, была продемонстрирована возможность измерения мгновенных значений концентрации NO в пределах одного оборота коленвала. Система измерения NO подключалась к общей системе измерения параметров дизеля.

Надежность и прочность пробоотборника особенно важна для главного судового дизеля, работающего на тяжелом топливе, с выпускным коллектором большого диаметра. Засорение пробоотборника может вывести его из строя, а при его механической поломке осколки могут попасть в турбокомпрессор со всеми вытекающими отсюда последствиями.

При создании системы измерения концентрации NO в отдельном цилиндре были решены следующие задачи:

- разработка конструкции быстродействующей системы отбора проб для главных судовых дизелей;

- обеспечение устойчивости системы к засорению датчика при высоком содержании частиц в отработавших газах;

- обеспечение надежной работы системы в условиях сильной пульсации потока газов, проходящего через выпускное окно;

- обеспечение надежной работы пробоотборника и остальных компонентов системы.

Применение системы измерения NO в отдельном цилиндре на многоцилиндровом двигателе может дать значительный экономический эффект, так как позволяет контролировать и настраивать параметры индивидуально по каждому цилиндру. При этом сокращается время, необходимое для оценки влияния настроек дизеля на параметры рабочего процесса. Кроме того, при разработке систем газоочистки или других способов снижения вредных выбросов (например, оптимизации угла опережения впрыска) можно будет учитывать изменение мгновенных значений концентрации в реальном времени и даже в течение одного рабочего цикла. При этом не только расширяются возможности экспериментальной проверки компьютерных моделей процесса сгорания, но и сокращается дорогостоящее время стендовых испытаний.

Работа частично финансировалась ЕС в рамках комплексного исследовательского проекта I.P. HERCULES.

Созданная система делает возможным измерение NO непосредственно в момент открытия выпускного клапана судового дизеля. Ее быстродействие составляет порядка 10 мс, что является очень хорошим показателем для главного судового двигателя. В дальнейшем предполагается провести сравнение полученных результатов с результатами измерений, проведенных при помощи аппаратуры, соответствующей требованиям ИМО.

Marios Ioannou и др.

National Technical University of Athens, Greece

КОНЦЕНТРАЦИЯ ЧАСТИЦ В ОГ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА МАЗУТЕ

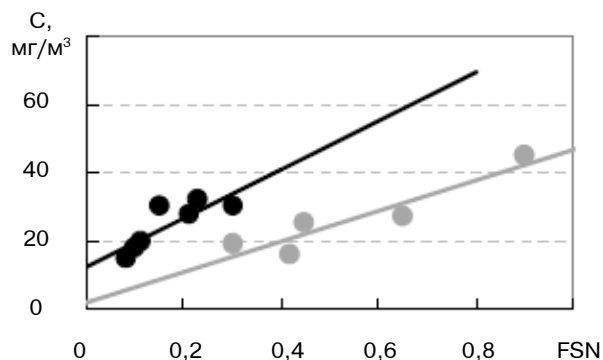
Наличие твердых частиц (PM — particulate matter) в ОГ энергетических объектов, в том числе дизелей, вызывает озабоченность во всем мире из-за общеизвестной корреляции между количеством частиц в воздухе и заболеваемостью. Частицы служат причиной целого ряда заболеваний, например, астмы.

Одним из существенных источников загрязнения воздушного бассейна являются дизели. Поскольку мелкие частицы легко переносятся вет-

ром, их токсичное воздействие нередко проявляется даже на больших расстояниях от источника загрязнения.

В настоящей работе приводится обзор различных методов определения количества частиц в ОГ дизелей. Кроме того, рассматриваются такие аспекты проблемы, как состав частиц, их распределение, осаждение частиц в легких человека, существующие нормативные документы и технологии снижения выбросов частиц. Приводятся также результаты сравнения выбросов частиц двигателей, работающих на дизельном и на тяжелом топливах. Рассматриваются такие способы снижения выбросов частиц, как совершенствование конструкции двигателя, повышение качества топлива и очистка отработавших газов.

На рисунке показан пример соотношения между показателем дымности (по горизонтали) и концентрацией частиц (по вертикали). На графике нанесены точки измерений и аппроксимирующие прямые, полученные при нагрузке 75 % (верхняя прямая) и при нагрузке 25 % (нижняя прямая).



мирующие прямые, полученные при нагрузке 75 % (верхняя прямая) и при нагрузке 25 % (нижняя прямая). Содержание частиц менялось с помощью регулирования настроек дизеля. Как выяснилось, универсальной корреляции между показателем дымности и концентрацией частиц не существует. Корреляционная кривая зависит от типа двигателя и его характеристик, нагрузки, частоты вращения, вида топлива и т. д.

Согласно опубликованным исследованиям, существует определенная зависимость между концентрациями частиц и заболеваемостью, т. е. количеством людей, поступивших в лечебные заведения. Для мелких частиц эта зависимость проявляется не столь сильно. Однако действительный механизм воздействия частиц на здоровье человека пока исследован мало.

Есть множество методов измерения концентрации частиц в отработавших газах, основанных на определении их физико-химических характеристик. Существующие нормативные документы, регламентирующие вредные выбросы, основаны на различных методах измерения концентрации частиц.

Основным стандартом, на базе которого ведется разработка нормативных документов, определяющих предельно допустимые выбросы существующих и вновь проектируемых судовых дизелей, является стандарт ИСО 8178, несмотря на то что в его основе лежит метод, заранее исключаящий применение высокосернистых топлив (которые, между тем, являются самым распространенным видом топлива для судовых дизелей). Согласно ИСО 8178, верхний предел содержания серы в топливе при котором допускается использование данного метода, равен 0,8 %, а в соответствии с рекомендациями СИМАС (23/2005), этот предел составляет 0,05 %.

Условия разбавления взятых проб оказывают огромное влияние на результаты измерений. При этом используются различные концентрации и методы разбавления (первичное, вторичное и т. п.), а также различные значения температуры и влажности воздуха. Все это сильно влияет на результат: фактически вы получаете то, что вам нужно. Сравнить результаты измерений по отчетам, полученным из различных источников, зачастую оказывается невозможным из-за различий в методах разбавления. Выполнение требований стандарта ИСО 8178 с различными системами частичного разбавления далеко не всегда очевидно.

Наибольшую роль в образовании частиц (в том числе мельчайших) играют сера и зола, содержащиеся в мазуте, используемом в качестве топлива для среднеоборотных дизелей, при работе на установившихся режимах. Как правило, 50–70 % общей массы частиц в отработавших газах составляют химические соединения, содержание которых напрямую связано с наличием серы и золы в топливе, и эта масса в принципе не может быть уменьшена за счет совершенствования рабочего процесса. Последнее может повлиять лишь на количество частиц (30–50 % от общей массы), которые состоят из сажи и углеводородов, содержащихся в топливе и смазочном масле.

Технологии снижения выбросов частиц, нашедшие применение в автотранспорте, такие как сажевые фильтры и окислительные нейтрализаторы, не могут быть использованы в крупных судовых дизелях, работающих на тяжелых сортах топлива, из-за высокого содержания в нем серы и золы, что приводит к быстрому засорению и выходу из строя систем очистки.

Goeran Hellen и др., Wartsila Finland Oy, Finland

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ SO_x С ПОМОЩЬЮ СКРУББЕРА

Необходимость исследования эффективности скруббера как средства снижения SO_x обусловлена ужесточением экологических нормативов, в час-

тности вводом в действие Tier 2 и требований к SECA (SO_x Emission Control Areas — зоны ограничения содержания SO_x).

В исследовательском центре MAN Diesel (Дания) были проведены испытания системы очистки ОГ дизелей на основе AVC (Advanced Vortex Chamber — усовершенствованной вихревой камеры). Впоследствии предполагается проведение испытаний AVC на судне в условиях эксплуатации.

В качестве объекта испытаний была использована типичная дизель-генераторная установка мощностью 1 МВт, работающая на тяжелом топливе с содержанием серы 2,3 %. Для этих испытаний израильской фирмой Vortex Ecological Technologies Ltd. была специально спроектирована и построена AVC с использованием морской воды из Балтики. В некоторых случаях к воде добавлялись соли.

Испытания двигателя выполнялись в соответствии с требованиями стандарта ИСО 8178, при этом проводились измерения NO_x, HC, CO и PM (частиц) до и после AVC, что позволило оценить эффективность газоочистки.

Промывочная вода анализировалась на содержание металлов, ПАУ (Poly-Aromatic Hydrocarbons — полиароматические углеводороды) и нефтепродуктов.

В зонах SECA допускается применение дизельных топлив с содержанием серы не выше 1,5 %, причем, как ожидается, к 2010 г. эта цифра снизится до 0,5 %. При этом не только существенно возрастают расходы судовладельцев на закупку малосернистого топлива, но и уменьшается выбор видов топлива.

В то же время стандарт Tier 2 (введен с 01.01.07), как и аналогичный документ EU Stage 3, устанавливает достаточно жесткие требования к содержанию других токсичных составляющих в отработавших газах, измеренных по ИСО 8178 (см. следующую таблицу).

Как показывает анализ, даже при идеальном сгорании и превращении 3 % содержащейся в топливе серы в PM, для двигателей с объемом цилиндра от 2,5 до 5 л указанные нормы могут быть выполнены только при содержании серы не более 0,9 %.

Объем цилиндра, л, и мощность, МВт	Выброс, г/кВт·ч		
	CO	NO _x +THC	PM
2,5 ≤ D < 5	5,0	7,2	0,20
5 ≤ D < 15	5,0	7,8	0,27
15 ≤ D < 20 P _e < 3,3 МВт	5,0	8,7	0,50
15 ≤ D < 20 P _e ≥ 3,3 МВт	5,0	9,8	0,50
20 ≤ D < 25	5,0	9,8	0,50
25 ≤ D < 30	5,0	11,0	0,50

Выбор системы AVC объясняется тем, что благодаря действующим на капли центробежным перегрузкам от 20 до 100 г их размер существенно уменьшается, а поверхность их контакта с водой соответственно возрастает. Это ведет к повышению эффективности циклона и снижению расхода воды по сравнению с другими системами газоочистки.

Как показало проведенное расчетно-экспериментальное исследование, вихрекамерная система газоочистки позволяет обеспечить существенное снижение выбросов частиц и SO_x . Эф-

фективность экспериментальной системы достаточно высока и имеет потенциал для дальнейшего роста.

Как ожидается, в области рабочих режимов дизеля можно достичь улавливания 90 % содержащихся в отработавших газах SO_x .

Коэффициент улавливания частиц достигает 70 %, что может стать весомым вкладом в снижение выбросов до уровня, предусмотренного Tier 2.

Flemming Bak, MAN Diesel A/S, Denmark

АКТУАЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

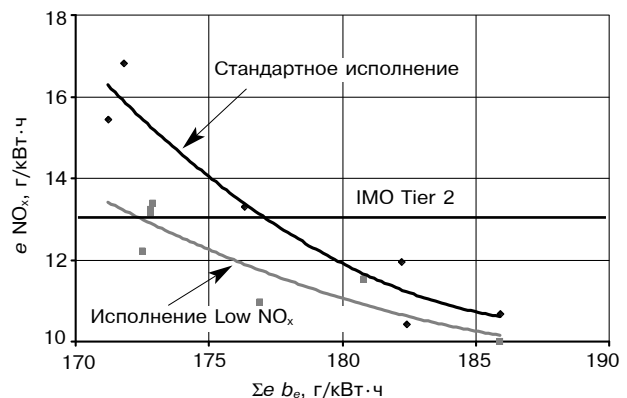
ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ ПРОИЗВОДСТВА БМЗ ТРЕБОВАНИЯМ ИМО TIER 2

В соответствии с резолюцией Конференции ИМО, принятой в 1997 году, Комитету по защите морской среды было предложено пересмотреть нормы предельно допустимых выбросов NO_x . В апреле 2006 г. рабочая группа ИМО пришла к выводу о том, что начиная с 2010 г. нормы выбросов NO_x (ИМО Tier 2) могут быть снижены по отношению к нормам ИМО Tier 1 примерно на 30 %. Приложение VI к международной Конвенции МАРПОЛ 73/78 было ратифицировано Россией в мае 2004 г., после того как стало очевидно, что российские дизели, поставляемые по зарубежным контрактам, полностью соответствуют нормам ИМО Tier 1.

За прошедшие годы производители судовых двигателей выполнили значительный объем исследований по совершенствованию показателей экологической безопасности, в основном за счет мероприятий по совершенствованию рабочего процесса дизеля и его основных систем (воздухоснабжения, топливоподачи, регулирования, выпуска, конструкции камеры сгорания и деталей КШМ). По результатам испытаний экспериментальных моделей за счет перечисленных мероприятий удалось снизить выбросы NO_x в современных среднеоборотных и малооборотных дизелях, в том числе работающих на тяжелых топливах, примерно на 30–35 %. Однако оставался открытым вопрос о сохранении эффективности этих мероприятий в условиях серийного производства, в особенности на предприятиях, выпускающих двигатели по лицензии.

В классе малооборотных двухтактных крейцкопфных дизелей с диаметром цилиндра от 260 до 600 мм, выпускаемых в России Брянским машиностроительным заводом (БМЗ) по лицензии MAN B&W AS, начиная с 2000 г. фирмой ООО «ЦНИДИ-Экосервис» постоянно проводятся сертификационные испытания этих двигателей на соответствие требованиям Правила 13 Приложения VI к МАРПОЛ 73/78. Достоверность результатов испытаний имеет высокую степень

надежности, поскольку все они выполнены в строгом соответствии с требованиями «Технического кодекса по ограничению выбросов NO_x от судовых дизельных двигателей» под надзором классификационных обществ BV (Франция), DNV (Норвегия), GL (Германия), RL (Англия), РМРС (Россия). Они показывают, что конструктивные и технологические решения, примененные на малооборотных судовых дизелях MAN B&W AS, полностью воспроизводятся в условиях производства на БМЗ, что позволило сократить удельные средневзвешенные выбросы NO_x (цикл испытаний E2, E3) серийных двигателей с 13–16 до 10–12 г/кВт·ч, при одновременном росте среднего эффективного давления с 14 до 20 бар. При этом норма выбросов NO_x (ИМО Tier 2) для малооборотных двухтактных крейцкопфных дизелей будет составлять ориентировочно 12,0–13,0 г/кВт·ч.



Результаты проведенного обследования показывают, что качество изготовления двигателей на БМЗ уже сегодня подтверждает готовность к введению норм выбросов NO_x (ИМО Tier 2) и у покупателей судовых дизелей с маркой БМЗ в ближайшем будущем не возникнет проблем ни с одной Администрацией по вопросам охраны окружающей среды.

*Материал подготовил Л.А. Новиков, к.т.н.
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»*