

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИИ (материалы конгресса CIMAC-2016)

В обзоре представлены материалы последнего конгресса CIMAC, посвященные развитию новых технологий в двигателестроении, направленных на решение актуальных проблем в областях снижения вредных выбросов в атмосферу и ресурсосбережения при изготовлении деталей сложной формы методом 3D-печати.

Фирма «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) представила результаты исследований и испытаний системы снижения выбросов NO_x за счет уменьшения концентрации кислорода в воздухе для сгорания топлива при использовании специальной полимерной мембраны (ORM — oxygen reduction membrane). Система взаимодействует только с воздухом на впуске в двигатель и на ее работу не оказывают влияния как вид топлива (например, мазут, дизельное топливо или природный газ), так и его отдельные характеристики (например, вязкость, содержание серы, теплотворная способность). В целях обеспечения требований IMO Tier III по выбросам NO_x без заметного увеличения расхода дизельного топлива и исключения режимов дымления, система ORM дополнена установкой приготовления стабильной водо-топливной эмульсии (ВТЭ) с получением наноразмерной дисперсной фазы (воды) без применения эмульгаторов.

Освоение 3D-печати компонентов двигателей из металлических порошков с послойным лазерным наплавлением позволяет обеспечить настоящий технологический прорыв в отрасли двигателестроения. Снимается целый ряд технологических ограничений, решительно пересматриваются традиционные методы проектирования и изготовления компонентов. Во всех промышленных областях между ведущими производителями развернулась настоящая гонка за лидерство в деле запуска в серию металлических деталей, изготовленных методами 3D-печати.

Компания «General Electric» (GE) чрезвычайно быстрыми темпами внедряет метод аддитивного производства (наслоения) методами 3D-печати металлических деталей двигателей. В докладе компании приводится обзор современного состояния технологии 3D-печати и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом. Показано, что при внедрении этой технологии необходимо радикальным образом изменить процесс проектирования и мышления инженеров-конструкторов, чтобы максимально использовать преимущества 3D-печати в сравнении с традиционными методами проектирования и изготовления деталей.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

СОЗДАНИЕ СИСТЕМЫ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ NO_x НА ОСНОВЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В СОЧЕТАНИИ С ДОБАВЛЕНИЕМ ВОДЫ В ТОПЛИВО

Kazuyuki Maeda, Dai Yamanishi,

Национальный Университет рыбной промышленности,

Япония

Junichi Hayashi,

Mitsui Engineering & Shipbuilding Co., Ltd., Япония

Atsushi Shimizu, Hirokazu Ohno, Junichi Oguma,

Asahi Kasei Chemicals Co., Ltd., Япония

Atushi Sakane, AST Consulting, Япония

Реферат

Нормы Международной Морской Организации (ИМО) Tier III предусматривают снижение выбросов вредных веществ от судов, находящихся в пределах зоны контролируемых выбросов (ECA), не менее чем на 80 % по сравнению с требованиями более низкого уровня IMO Tier II. Фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) была разработана система для снижения содержания кислорода (ORM — oxygen reduction membrane) на основе мембраны, привлекающая широкое внимание специалистов. Система снижает выбросы NO_x за счет уменьшения концентрации кислорода во впускном тракте с помощью специальной мембраны. Система ORM устанавливается на впуске в газозвдушной

тракт, поэтому на ее работу не влияют ни вид топлива (например, мазут, морское дизельное топливо или газ), ни его отдельные характеристики (например, содержание серы). К тому же система взаимодействует только с воздухом, и, следовательно, не представляет опасности для окружающей среды.

Настоящая работа посвящена экспериментальной проверке эффективности системы ORM в качестве средства снижения выбросов NO_x. Система ORM была испытана при работе в составе четырехтактного высокооборотного судового дизеля и двухтактного среднеоборотного одноцилиндрового дизеля. При этом изучалось влияние концентрации кислорода в воздушном тракте двигателя на уровень выбросов NO_x. Система ORM может быть использована для задания определенной концентрации кислорода в воздушном заряде с помощью полимерной мембраны. Эксперименты подтвердили реальность уменьшения концентрации кислорода в воздухе с помощью ORM. В серии экспериментов эффективность ORM по снижению выбросов NO_x оценивается также в сочетании с использованием водотопливной эмульсии (ВТЭ).

Как показал анализ результатов, снижение концентрации кислорода сопровождалось уменьшением выбросов NO_x на всех режимах работы двигателя. При этом для выполнения требований

IMO Tier II по выбросам NO_x достаточно задать концентрацию кислорода менее 17 %. Снижение концентрации кислорода до 19 % позволяет снизить выбросы NO_x на 50 % без сколько-нибудь ощутимого изменения расхода топлива. Если при этом дополнительно использовать ВТЭ с содержанием воды 60–80 %, то этого уже достаточно для выполнения требований IMO Tier III. Кроме того, использование системы ORM при нахождении судна вне зоны ECA (non-ECA region) позволяет снизить расход топлива.

Важно отметить, что упомянутые системы, использующие только воздух и воду, полностью безопасны для окружающей среды.

1. Введение

Морской транспорт является существенным компонентом любой экономики. К сожалению, океанские суда, оборудованные мощными двигателями внутреннего сгорания, являются источниками большого количества вредных выбросов и парниковых газов, загрязняющих атмосферу. С этим связано постоянное ужесточение экологических требований, что вызывает острую необходимость в поисках путей снижения выбросов NO_x и CO_2 от морских судов.

Нормы Международной Морской Организации (IMO) Tier III предусматривают снижение выбросов вредных веществ от судов, находящихся в пределах зоны контролируемых выбросов (ECA), не менее чем на 80 % по сравнению с требованиями более низкого уровня IMO Tier II. Для этого предлагалось использовать системы селективного каталитического восстановления (SCR) и рециркуляции отработавших газов (EGR). В системах SCR в качестве восстановителей используются аммиак либо мочевины. Однако данная технология, широко используемая в сухопутных установках, в судовых условиях имеет свои ограничения, связанные с низкой температурой отработавших газов. В системах EGR концентрация O_2 в воздушном заряде снижается путем смешивания отработавших газов со свежим воздухом. К тому же наличие CO_2 в отработавших газах на выходе из контура рециркуляции увеличивает их теплоемкость, что приводит к снижению температуры горения факела, а следовательно — к снижению выбросов NO_x . Однако отработавшие газы перед их поступлением в контур рециркуляции необходимо очистить от сернистых соединений, золы и частиц (PM).

Кроме того, IMO ввела нормирование показателя энергоэффективности (EEDI — energy efficiency design index) и ограничения на выброс черного углерода в Арктике. EEDI — это норматив, означающий количественное ограничение выбросов CO_2 от судов, и этот норматив посте-

пенно становится все более жестким. Целевые показатели EEDI стали обязательными для судов коммерческого флота, что приводит к необходимости сокращения расхода топлива судовыми двигателями. Ограничения на выброс черного углерода планируется ввести в ближайшем будущем, когда IMO опубликует соответствующий нормативный документ. Черный углерод — это практически сажа, входящая в состав PM. Налипание сажи на поверхность катализатора в системе SCR ведет к снижению эффективности катализатора.

В последнее время заметное внимание уделяется системам на основе мембраны, снижающей содержание кислорода (ORM), разработанные фирмой «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония). Система снижает выбросы NO_x за счет снижения концентрации кислорода во впускном воздухе с помощью специальной мембраны.

Кроме того, разработана новая система приготовления и подачи водотопливной эмульсии (WMF) без использования присадок. Это способствует уменьшению выбросов NO_x благодаря снижению температуры пламени, поскольку часть тепла расходуется на парообразование. В то же время благодаря совершенствованию процесса сгорания топлива снижается концентрация черного углерода в отработавших газах.

В ходе настоящей работы был выполнен ряд экспериментальных исследований по оценке эффективности обоих упомянутых методов как средства снижения выбросов NO_x судовыми двигателями.

Система ORM, в состав которой входит полимерная мембрана, может использоваться для регулирования (в данном случае — снижения) концентрации O_2 в воздушном заряде. В ходе экспериментов проверялись:

1) *влияние концентрации O_2* : с помощью осушителя влажность воздуха на всасывании доводилась до нуля, затем концентрация O_2 с помощью ORM снижалась с 21 до 17 %;

2) *влияние ВТЭ*: с помощью вновь разработанного генератора ВТЭ соотношение долей воды и горючего (W/FO) изменялось от 0 до 80 % без использования присадок;

3) *влияние ORM в сочетании с ВТЭ*: концентрация кислорода с помощью ORM устанавливалась последовательно на уровне 21, 20 и 19 %, и в каждом режиме соотношение долей воды и горючего постепенно увеличивалось;

4) *ресурсные испытания мембраны в составе действующей судовой установки в эксплуатационных условиях*: мембрана была установлена на вспомогательный дизель-генератор судна валовой вместимостью 2500 тонн.

Таблица 1

Технические характеристики опытных двигателей

	Двигатель	
	4-тактный	2-тактный
Число цилиндров	6	1
Диаметр цилиндра, мм	100	400
Ход поршня, мм	110	1360
Макс. мощность, кВт	214	842
Скорость двигателя, об/мин	3101	176
Макс. p_{me} , МПа	1,59	1,68
Вид топлива	Газойль	MDO

Таблица 2

Свойства топлив

Вид топлива	Газойль	MDO
Плотность, кг/м ³	828,4	857,6
Кинематическая вязкость, мм ² /с	3,357	3,143
C, % массы	86,2	86,0
H, % массы	13,8	12,8
S, % массы	0,0007	0,09
N, % массы	—	0,01

2. Оборудование стенда и методика экспериментов
Стендовая установка

В качестве опытных двигателей использовались четырехтактный высокооборотный судовый дизель (лаборатория «Национального Университета рыбной промышленности» (NFU)) и двухтактный среднеоборотный одноцилиндровый дизель (лаборатория «Mitsui Engineering and Shipbuilding Co., Ltd» (MES)). Технические характеристики опытных двигателей и свойства использованных в экспериментах топлив приведены в табл. 2.1 и 2.2.

Схема организации потоков воздуха во всасывающем тракте и подачи ВТЭ показаны на рис. 2.1. Как показали результаты испытаний, сжатие воздуха в турбокомпрессоре и/или в приводном нагнетателе при его прохождении через систему ORM позволяет снизить концентрацию O₂ до 17 %. В экспериментах с 4-тактным двигателем приводной нагнетатель использовался вместо турбокомпрессора, а в экспериментах с 2-тактным двигателем он работал совместно с турбокомпрессором. В генераторе ВТЭ происходит смешивание горючего с водой, при этом соотношение воды и горючего может изменяться от 0 до 80 %. Это одна из наших последних разработок, позволяющая задавать любое значение соотношения W/FO («вода/горючее») в указанных пределах без использования каких-либо присадок. Такая возможность обеспечивается за счет уменьшения размера водяных капель до наноразмера, при этом генератор размещается в непосредственной близости от устройства топливоподачи.

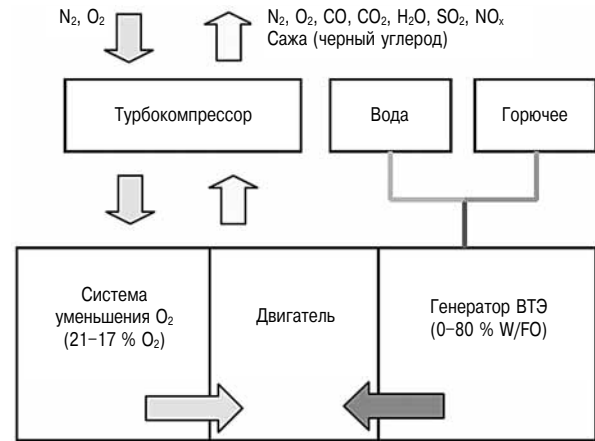


Рис. 2.1. Схема организации потоков воздуха, отработавших газов и ВТЭ в экспериментальной установке

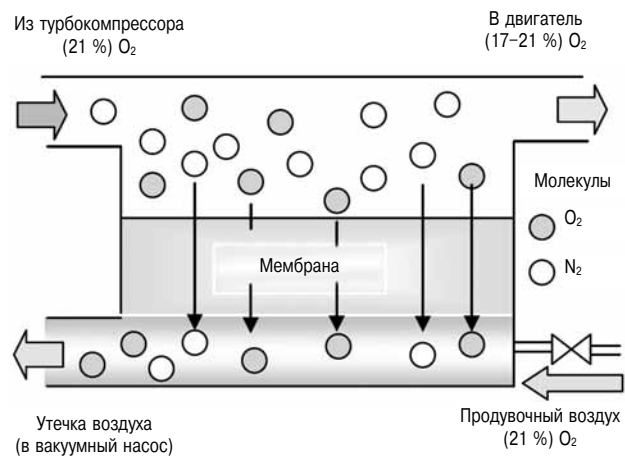


Рис. 2.2. Принцип действия мембраны для снижения концентрации кислорода

Принцип работы системы ORM показан на рис. 2.2. При возникновении перепада давления между передней (входной) и задней (выходной) сторонами мембраны через нее в двигатель начинает поступать воздух, состоящий, как известно, из кислорода и азота, причем молекулы кислорода проходят через мембрану легче, чем молекулы азота. Поэтому концентрация кислорода в воздухе, попадающем в камеру сгорания, ниже, чем перед мембраной. Известны три способа эффективного снижения концентрации в воздушном ресивере. Первый способ — повышение давления на входе в мембрану с помощью турбонадува. Второй способ заключается в поддержании концентрации O₂ за мембраной на уровне 21 % путем использования продувочного воздуха. Третий способ состоит в снижении давления за мембраной с помощью вакуумного насоса.

Принцип действия генератора ВТЭ показан на рис. 2.3. Как известно, вода и MDO имеют разную природу и плотность, поэтому в обычных

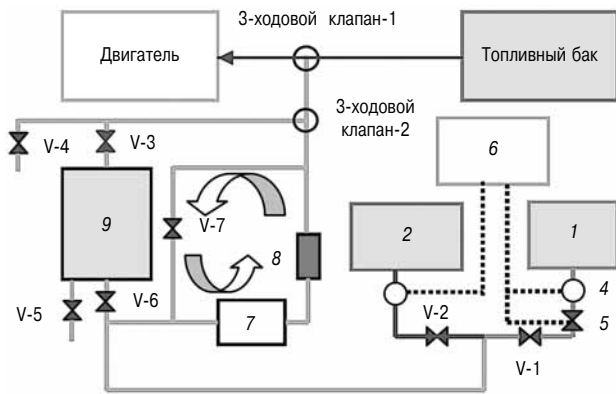


Рис. 2.3. Блок-схема генератора ВТЭ

1 — водяной бак; 2 — топливный бак; 3 — расходомер для горючего; 4 — расходомер для воды; 5 — регулирующий клапан; 6 — пульт управления; 7 — циркуляционный насос; 8 — смеситель; 9 — разделительный бачок

условиях их смешивание без специальных присадок невозможно. Как уже отмечалось, смешивание воды и горючего обеспечивается без использования присадок другими средствами.

Во-первых, конфигурация системы такова, что интервал времени между впрыском ВТЭ и началом сгорания недостаточен для разделения ВТЭ на воду и горючее, поскольку генератор ВТЭ устанавливается непосредственно перед топливной форсункой. Во-вторых, в устройстве имеется разделительный бачок. В нем происходит разделение ВТЭ на воду и горючее благодаря их разной плотности, после чего горючее может быть возвращено в топливный бак. И наконец, устройство может генерировать два вида ВТЭ — вода в горючем (прямая эмульсия) или горючее в воде (обратная эмульсия). Обычно горючее в двигатель поступает непосредственно из топливного бака (см. рис. 2.3).

Добавление воды к горючему осуществляется в следующей последовательности:

- клапаны V-2 и V-3 открываются, а клапан V-1 закрывается, так что в линию приготовления ВТЭ подается только горючее;

- сигнал задания (уставки) необходимого соотношения W/FO поступает на пульт управления;

- для подготовки к приготовлению ВТЭ клапан V-1 открывается (это состояние должно быть подтверждено закрытием клапана V-4);

- трехходовые клапаны 1 и 2 переводятся в такое положение, при котором ВТЭ будет подаваться в двигатель.

Добавление горючего к воде осуществляется в следующей последовательности:

- клапаны V-1 и V-3 открываются, а клапан V-2 закрывается, так что в линию приготовления ВТЭ подается только вода;

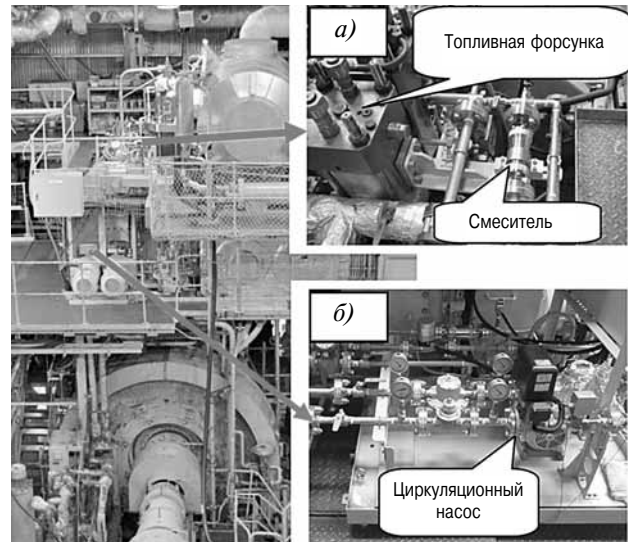


Рис. 2.4. Генератор ВТЭ и связанные с ним элементы опытной установки

- сигнал задания (уставки) необходимого соотношения W/FO поступает на пульт управления;

- для подготовки к приготовлению ВТЭ клапан V-2 открывается (это состояние должно быть подтверждено закрытием клапана V-4);

- трехходовые клапаны 1 и 2 переводятся в такое положение, при котором ВТЭ будет подаваться в двигатель. Все это время клапаны V-5 и V-6 остаются закрытыми.

Клапан V-7 используется для регулирования давления подаваемой в двигатель ВТЭ. В разделительном бачке находятся горючее, вода и ВТЭ. Сначала, когда открывается V-5, из разделительного бачка выпускается вода. Затем, когда открывается V-6, оставшееся горючее подается в двигатель.

Фотографии генератора ВТЭ и элементов опытной установки показаны на рис. 2.4. На фото

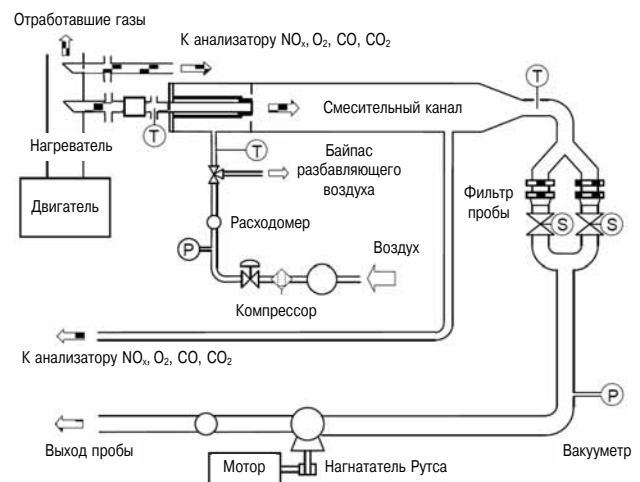


Рис. 2.5. Система измерения РМ

(а) показан смеситель, расположенный непосредственно перед форсункой, а на фото (б) — циркуляционный насос и связанные с ним компоненты. Конфигурация реальной системы может отличаться от показанной на рисунке, так как каждый из компонентов, за исключением смесителя, может размещаться и в других местах.

На рис. 2.5 схематически изображена система измерения содержания РМ. Отработавшие газы поступают в смесительный канал (горизонтального типа). Подача отработавших газов в смесительный канал осуществляется через систему трубок с двойными стенками, которая подогревается таким образом, чтобы ее температура была равна температуре выпускной трубы. При выборе конструкции системы трубок и температуры ее нагрева ставилась задача свести к минимуму возможность прилипания растворимых органических фракций (SOF — soluble organic fractions), содержащихся в несгораемых компонентах масла и топлива (и составляющих основную часть РМ), к стенкам соединительной линии в смесительном канале. Состав РМ (сажа, SOF и сульфат) определялся путем анализа в экстракторе Сокслета.

В ходе экспериментов выполнена оценка эффективности снижения выбросов NO_x за счет применения технологии ORM — как отдельно, так и в сочетании с ВТЭ. Кроме того, получены данные о долговечности мембраны в судовых условиях.

3. Результаты исследования

3.1. Снижение выбросов NO_x с помощью ORM

На рис. 3.1–3.3 показаны результаты экспериментов по снижению выбросов NO_x на 4-тактном двигателе. Как видно из рис. 3.1, при снижении концентрации O_2 выбросы NO_x уменьшаются при любой нагрузке двигателя. Это объясняется тем, что при снижении концентрации O_2 температура сгорания топлива также уменьшается, главным образом — из-за эффекта разбавления смеси инертным газом. Выбросы NO_x сокращаются примерно на 25 и 50 % при снижении концентрации O_2 до 20 и 19 % соответственно. Если концентрация O_2 будет снижена до 17 % и менее, то выбросы NO_x соответствуют требованиям IMO Tier III.

На рис. 3.2 показано изменение выбросов NO_x при использовании трех упомянутых выше способов снижения концентрации O_2 . Точка 1 соответствует случаю, когда концентрация O_2 на входе в двигатель снижена до 19 % за счет повышения давления перед мембраной; точка 2 — когда концентрация O_2 после мембраны поддерживается на уровне 21 % за счет использования продувочного воздуха, а точки 3 и 4 — когда концентрация O_2 уменьшается благодаря снижению

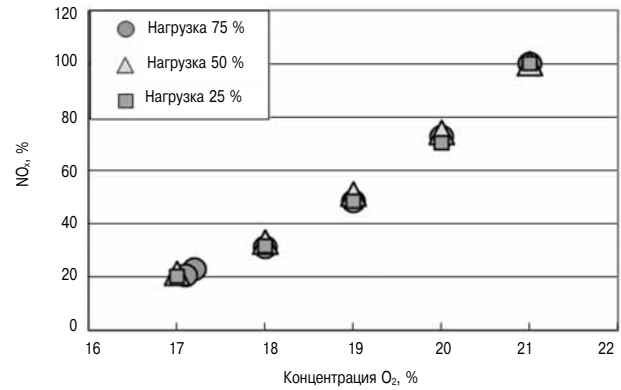


Рис. 3.1. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O_2 (4-тактный двигатель)

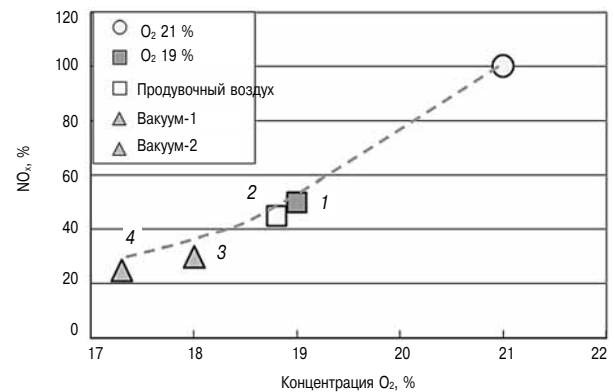


Рис. 3.2. Влияние декомпрессии с помощью вакуумного насоса (4-тактный двигатель, нагрузка 75 %)

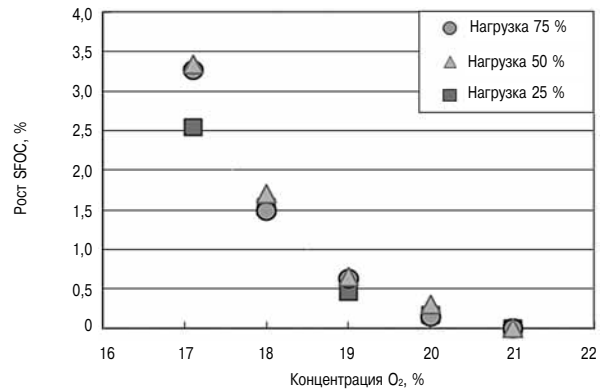


Рис. 3.3. Изменение SFOC в зависимости от концентрации O_2 (4-тактный двигатель)

давления за мембраной с помощью вакуумного насоса. Очевидно, что выбросы NO_x всегда снижаются при уменьшении концентрации O_2 на входе в двигатель любым способом.

Снижение концентрации O_2 на входе в двигатель ухудшает качество сгорания топлива. На рис. 3.3 показано соотношение между концентрацией O_2 и удельным расходом топлива (SFOC). Даже если концентрация O_2 уменьшилась до 20 %, связанный с этим рост SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем уменьшении концентрации O_2 увеличение расхода топлива

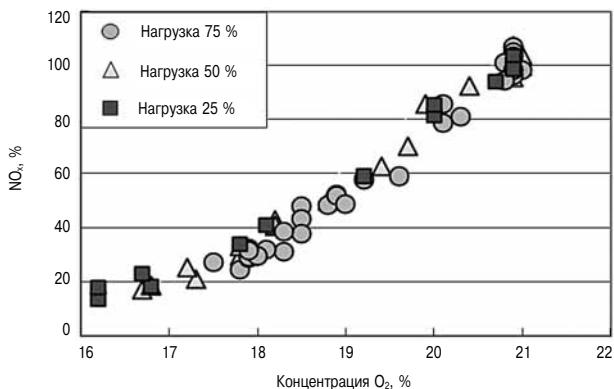


Рис. 3.4. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O₂ (2-тактный двигатель)

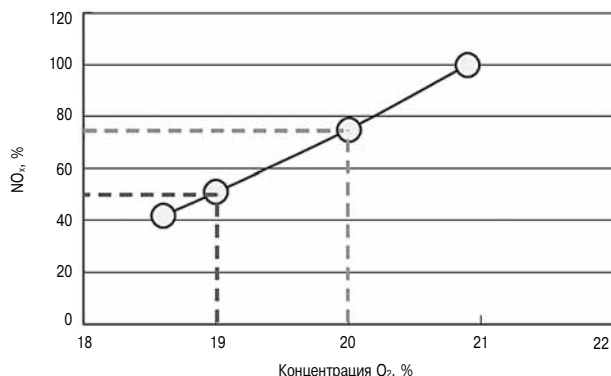


Рис. 3.5. Изменение выбросов NO_x в зависимости от концентрации O₂ (2-тактный двигатель)

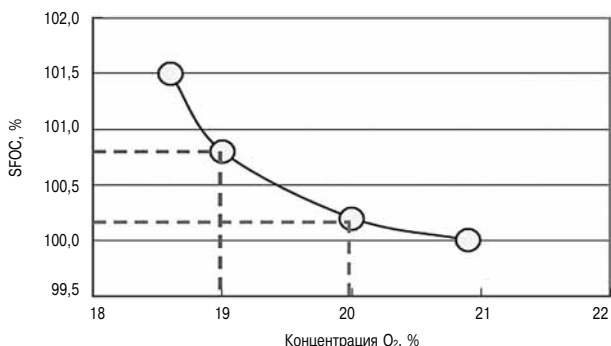


Рис. 3.6. Зависимость SFOC от концентрации O₂

становится более заметным. Так, при значениях концентрации O₂ 19 и 18 % рост SFOC достигает 0,5 и 1,5 % соответственно. При снижении концентрации O₂ до 17 % SFOC возрастает примерно на 3 %.

На рис. 3.4–3.6 показаны результаты экспериментов на 2-тактном двигателе.

На рис. 3.4 и 3.5 показано, что выбросы NO_x уменьшаются со снижением концентрации O₂ при любой нагрузке двигателя. При снижении концентрации O₂ до 20 и 19 % выбросы NO_x уменьшаются примерно на 25 и 50 % соответственно. И наконец, при снижении концентрации O₂ до 17 % и менее уровень выбросов NO_x оказывается ниже предельно допустимых значений IMO

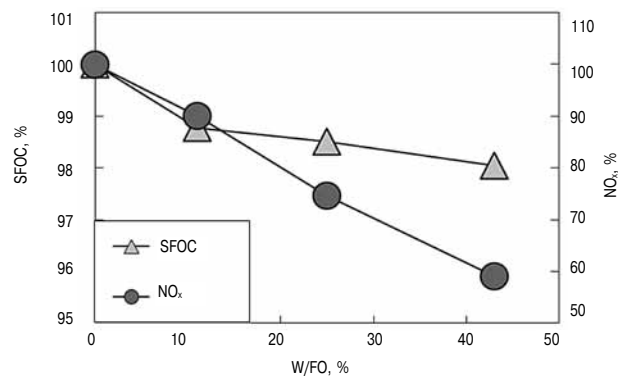


Рис. 3.7. Изменение выбросов NO_x и SFOC в зависимости от соотношения W/FO (4-тактный двигатель, нагрузка 75 %)

Tier III. На рис. 3.6 приведена зависимость SFOC от концентрации O₂. Как видно, даже если концентрация O₂ уменьшилась до 20 %, рост SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем уменьшении концентрации O₂ темпы прироста SFOC увеличиваются, и при значениях O₂ = 19 и 18,5 %, SFOC возрастает соответственно на 0,8 и 1,5 %.

3.2. Снижение выбросов NO_x при использовании ВТЭ

На рис. 3.7 показаны зависимости выбросов NO_x и SFOC от соотношения W/FO для

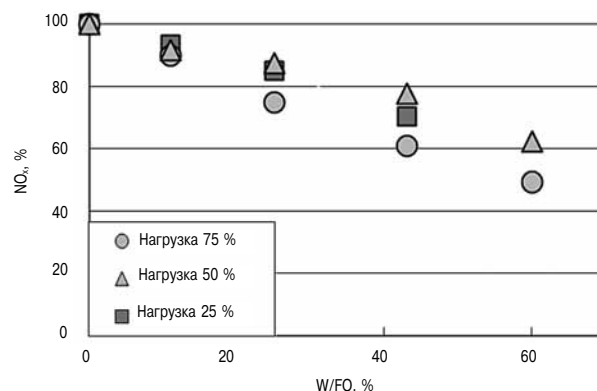


Рис. 3.8. Зависимость NO_x от соотношения W/FO (4-тактный двигатель)

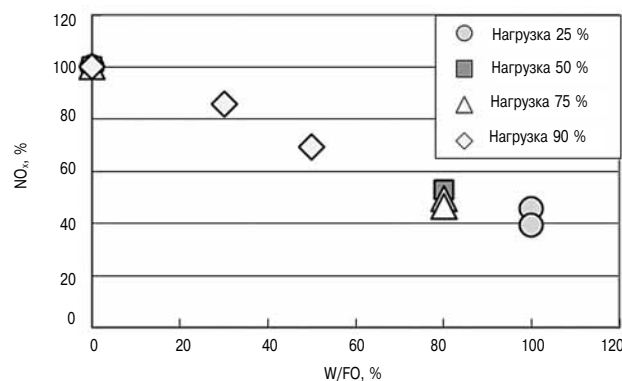


Рис. 3.9 Зависимость NO_x от соотношения W/FO (2-тактный двигатель)

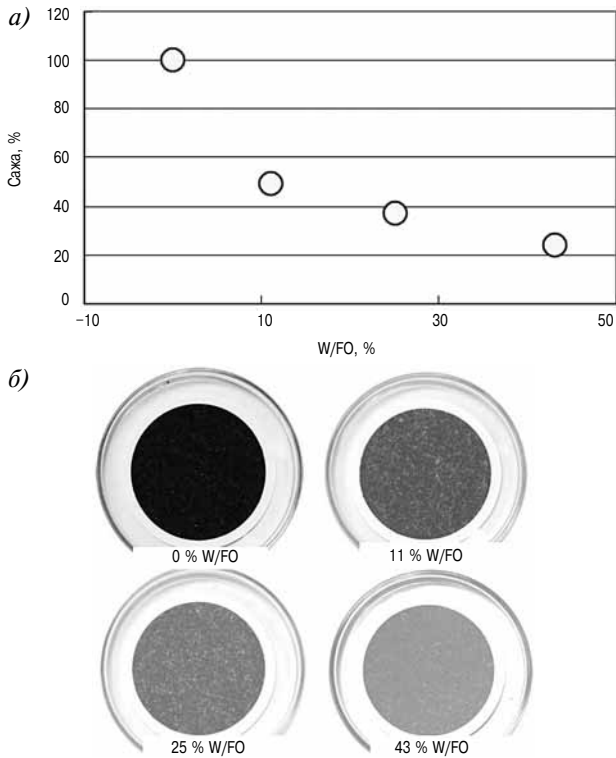


Рис. 3.10. Снижение выбросов сажи (черный углерод)

4-тактного двигателя. С ростом соотношения W/FO одновременно снижаются как выбросы NO_x , так и расход топлива. Обычно снижение выбросов NO_x сопровождается увеличением расхода топлива, поэтому приходится находить компромисс между этими показателями. В данном случае, однако, характер зависимостей иной, что составляет существенное преимущество использования ВТЭ: данная технология позволяет снизить выбросы NO_x без потерь топливной экономичности.

На рис. 3.8 и 3.9 показаны зависимости выбросов NO_x от соотношения W/FO и при нагрузке 25, 50 и 75 % для 4- и 2-тактного двигателей. При соотношении W/FO, равном 1:1, выбросы NO_x уменьшились примерно на 30 % для обоих типов двигателя. При увеличении содержания воды в ВТЭ до 80 % снижение выбросов NO_x достигло 50 %.

Рис. 3.10 иллюстрирует снижение выбросов сажи при использовании ВТЭ. В части (a) данного рисунка показано относительное изменение удельных выбросов сажи (г/кВт·ч), а в части (б) — изменение количества сажи, остающейся на фильтре (соответственно меняется цвет фильтра). Показано, что при увеличении соотношения W/FO выбросы сажи существенно снижаются. При соотношении W/FO 25 и 43 % соответствующее снижение выбросов сажи составляет примерно 60 и 80 %. При этом окраска фильтра меняется от черного до светло-серого.

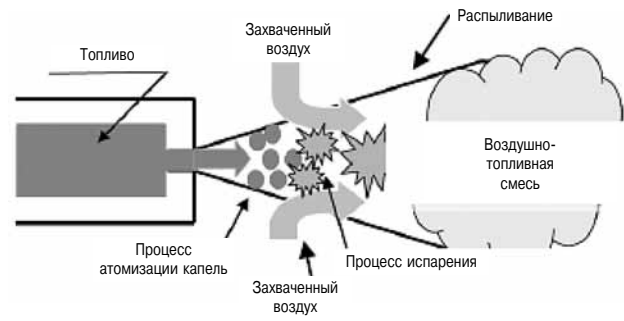


Рис. 3.11. Диаграмма распыливания топлива

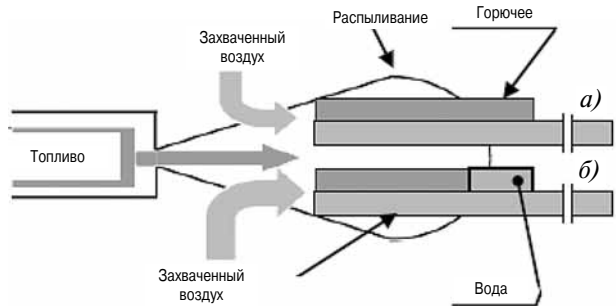


Рис. 3.12. Сравнение количества топлива и захваченного воздуха при использовании чистого топлива (a) и ВТЭ (б)

На рис. 3.11 схематически показан процесс распыливания топлива. На первом этапе струя горючего, вылетающая с большой скоростью из сопла форсунки, распадается на мельчайшие капли. Эти капли под воздействием захватываемого потоком нагретого воздуха образуют горючую воздушно-топливную смесь. Масса захватываемого потоком воздуха пропорциональна количеству движения впрыснутой субстанции.

Рис. 3.12 иллюстрирует процессы захвата воздуха струей топлива (a) и струей ВТЭ (б). В первом случае струя, вылетающая из распылителя, состоит из чистого топлива, во втором — из ВТЭ.

Количество движения и масса впрыснутой субстанции в начальной фазе впрыска в обоих случаях практически одинаковы, а значит, одинаково и количество захваченного воздуха. В то же время количество топлива в струе в случае (б) меньше, чем в случае (a), поскольку в первом случае струя кроме топлива содержит еще и воду. Следовательно, соотношение воздух—топливо в случае (б) больше, чем в случае (a).

В конце фазы впрыска (на рисунке этот момент не показан) количество движения струи в случае (б) больше, чем в случае (a), так как оно пропорционально соотношению W/FO. Следовательно, количество захваченного воздуха в случае (б) больше чем в случае (a). Следовательно, соотношение воздух—топливо в струе ВТЭ всегда будет выше, чем в струе чистого топлива, поэтому

выбросы РМ уменьшаются пропорционально содержанию воды в ВТЭ. При этом влияние ВТЭ на SFOC может быть как положительным, так и отрицательным. Увеличение количества захваченного воздуха приводит к ускорению сгорания, полезная работа (на поршне) возрастает за счет объема паров воды. Эти факторы можно считать позитивными. Негативные факторы: длительность впрыска возрастает, а температура рабочего тела снижается за счет испарения воды. При оптимальной настройке соотношения W/FO и углов впрыска можно добиться того, что позитивные факторы перевесят негативные, и удельный расход топлива в итоге уменьшится.

Как уже упоминалось ранее, добавление воды в топливо позволяет уменьшить выбросы NO_x . Результаты выполненного исследования показывают, что испарение воды снижает температуру пламени, тем самым уменьшая скорость образования и выбросов NO_x .

Таким образом, добавление воды в топливо способно обеспечить не только уменьшение SFOC, но и одновременное снижение выбросов NO_x и РМ.

3.3. Уменьшение выбросов NO_x при помощи ORM и ВТЭ

Как было показано, работа на ВТЭ позволяет уменьшить выбросы NO_x , используя для этого

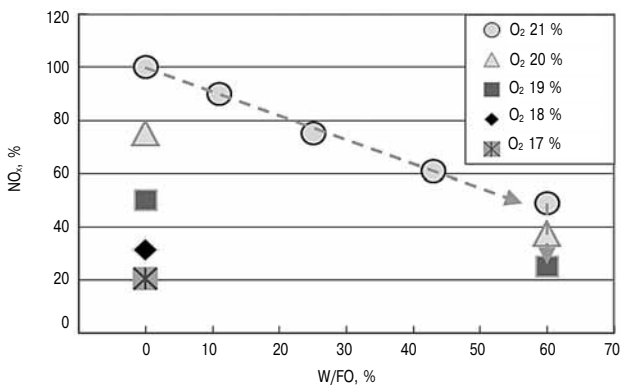


Рис. 3.13. Изменение выбросов NO_x при одновременном использовании ORM и ВТЭ (4-тактный двигатель)

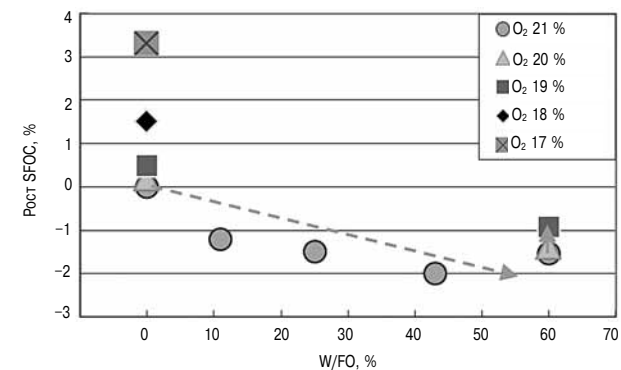


Рис. 3.14. Изменение SFOC при одновременном использовании ORM и ВТЭ (4-тактный двигатель)

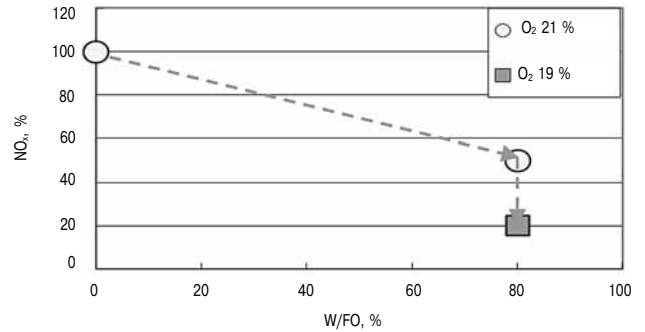


Рис. 3.15. Изменение выбросов NO_x при одновременном использовании ORM и ВТЭ (2-тактный двигатель)

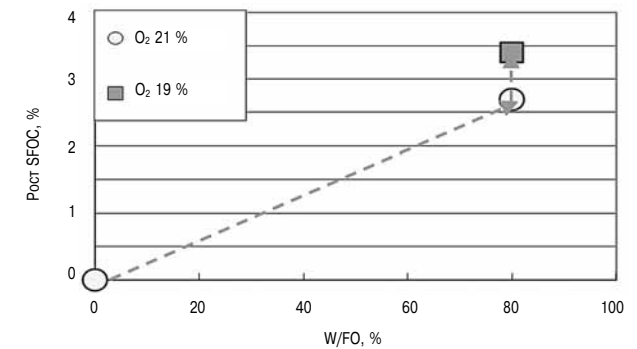


Рис. 3.16. Изменение SFOC при одновременном использовании ORM и ВТЭ (2-тактный двигатель)

минимум оборудования. Однако, как видно из рис. 3.9, даже при соотношении W/FO, равном 100 %, максимальное снижение выбросов NO_x составляет около 60 %, что недостаточно для выполнения требований IMO Tier III. Следовательно, соотношение W/FO должно быть увеличено путем реконфигурации системы впрыска и/или другими средствами. В выполненном исследовании в качестве такой технологии была выбрана система ORM.

На рис. 3.13 показано влияние соотношения W/FO в топливе и концентрации O_2 в воздушном ресивере на выбросы NO_x ; на рис. 3.14 — изменение SFOC в зависимости от обеих указанных переменных на 4-тактном двигателе.

Как было сказано ранее, уровень выбросов NO_x при снижении концентрации O_2 до 17 % понижается на 80 %, что обеспечивает соответствие требованиям IMO Tier III. Однако при этом расход топлива увеличивается примерно на 3 % (см. рис. 3.14). Эффект от совместного использования ВТЭ и ORM показан на рис. 3.13 и 3.14. Было установлено, что расход топлива почти не меняется, при этом снижение концентрации O_2 до 19 % позволяет снизить выбросы NO_x настолько, что обеспечивает соответствие требованиям IMO Tier III.

На рис. 3.15 показано влияние совместного использования ВТЭ и ORM на выбросы NO_x , а на рис. 3.16 — соответствующее изменение

расхода топлива (в 2-тактном двигателе). Уровень выбросов NO_x снижается примерно на 50 % при соотношения W/FO 80 %, а при использовании ORM уменьшается еще на 83 %. Расход топлива увеличивается на 2,8 % при соотношении W/FO 80 %, а при использовании ORM увеличивается еще на 0,5 %. Это еще раз подтверждает, что наиболее эффективным средством снижения выбросов NO_x является сочетание ORM и ВТЭ. Важно также отметить то, что эти системы, использующие только воздух и воду, для окружающей среды абсолютно безвредны.

3.4. Ресурсные испытания на борту действующего судна

Следующий этап исследований предусматривал проведение ресурсных испытаний на борту судов дальнего плавания. Для этого были выбраны учебные теплоходы «Тепуо-Магу» и «Коуо-Магу», принадлежащие Национальному Университету рыбной промышленности (NFU).

Сначала проводились ресурсные испытания опытной системы ORM, схема которой показана на рис. 3.17. Воздух, поступающий из машинного помещения, через турбокомпрессор подается в систему ORM. Перепад давления на ORM изме-

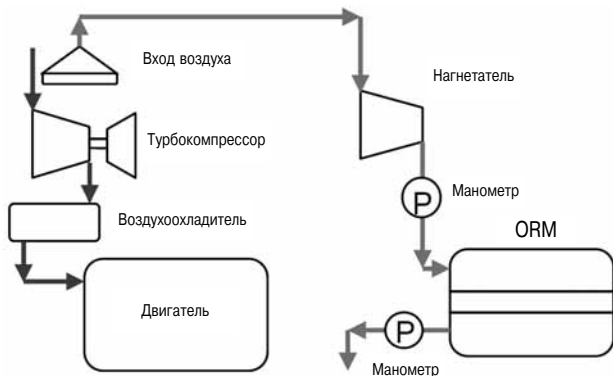


Рис. 3.17. Схема системы ORM на борту «Тепуо-Магу»

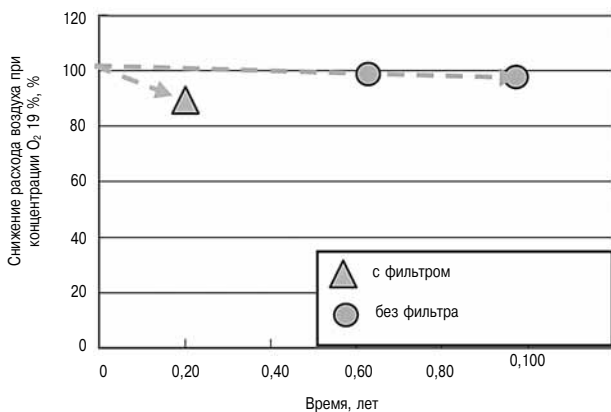


Рис. 3.18. Показатели эффективности мембраны ORM в функции времени



Рис. 3.19. Учебное судно «Коуо-Магу»

рялся с помощью дифманометра, который таким образом фиксировал любые ухудшения состояния мембраны. При измерении расхода воздуха с уменьшенным содержанием O_2 (ORA — oxygen reduced air) для анализа брался картридж ORM. На рис. 3.18 показано изменение расхода воздуха через мембрану при 19 % O_2 . В отсутствие фильтра предварительной очистки расход воздуха при 19 % O_2 сразу же начинает уменьшаться, что свидетельствует об ухудшении состояния мембраны. Однако при наличии фильтра предварительной очистки (на входе в турбокомпрессор) такого эффекта не наблюдается. Таким образом, мембрана ORM при наличии фильтра предварительной очистки демонстрирует хорошую устойчивость.

После этого испытания были продолжены на вспомогательном двигателе теплохода «Коуо-

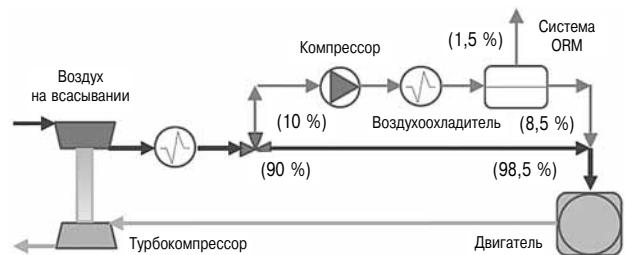


Рис. 3.20. Схема опытной установки

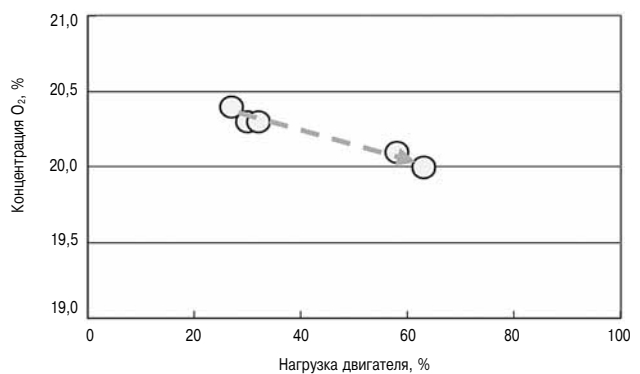


Рис. 3.21. Зависимость концентрации O_2 от нагрузки двигателя («Коуо-Магу»)

Маги». На рис. 3.19 показана фотография «Коуо-Маги», а на рис. 3.20 — схема экспериментальной установки. Воздух на пути к мембране сжимается в компрессоре. Концентрация O_2 , а также расход, температура и давление воздуха измеряются как перед мембраной, так и на выходе из нее. С помощью этих измерений фиксируются изменения эффективности мембраны при работе двигателя на различных режимах. Результаты измерений показаны на рис. 3.21. Установлено, что концентрация O_2 за мембраной при увеличении нагрузки двигателя уменьшается. Это объясняется тем, что давление воздуха на всасывании с ростом нагрузки двигателя увеличивается, что положительно сказывается на эффективности мембраны. Типичный диапазон нагрузки вспомогательного генератора составляет 50–80 %, поэтому концентрация O_2 на всасывании снижается примерно до 20 %.

3.5. Снижение выбросов NO_x и CO_2 за пределами зон ECA

Результаты исследований, о которых говорилось выше, относятся к технологиям снижения выбросов NO_x в зонах ECA. Все упомянутые ранее технологии — SCR, EGR, а также ORM в сочетании с ВТЭ — направлены на снижение выбросов NO_x во время нахождения судна в зонах ECA. Применение каждой из них имеет свою специфику. Вместе с тем на области, имеющие статус ECA, приходится не более 10 % всего морского трафика. Понятно, что проблема снижения выбросов NO_x и CO_2 для остальных 90 % трафика остается актуальной. Поэтому нашей следующей задачей был поиск способов снижения выбросов NO_x и CO_2 в зонах «non-ECA».

На рис. 3.22 показана взаимосвязь NO_x и SFOC при работе с системой ORM. SFOC растет лишь незначительно при концентрации O_2 20 %, тогда как выбросы NO_x при этом сокращаются примерно на 25 %. Это еще раз подтверждает вывод о том, что применение мембраны ORM может обеспечить снижение выбросов

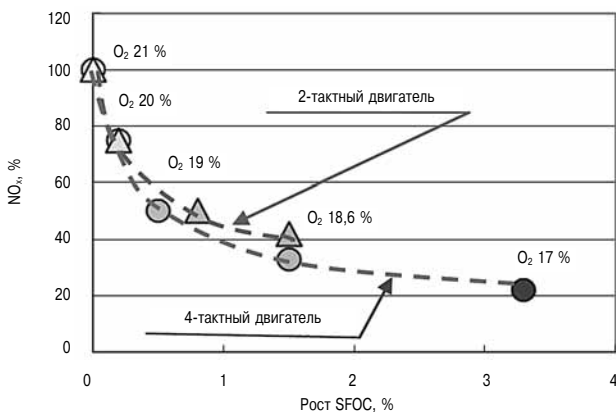


Рис. 3.22. Взаимосвязь между NO_x и SFOC при использовании ORM

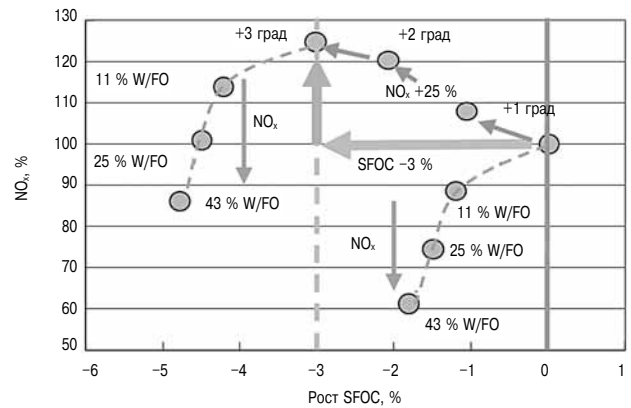


Рис. 3.23. Взаимосвязь между NO_x и SFOC (4-тактный двигатель)

NO_x без значительного увеличения расхода топлива.

На рис. 3.23 показаны результаты экспериментов на 4-тактном двигателе. Сначала уровень выбросов NO_x был снижен с помощью системы ВТЭ, при этом выбросы NO_x уменьшились на ~ 10 % при соотношении W/FO, равном 11 %. Возможно дальнейшее снижение выбросов NO_x за счет увеличения соотношения W/FO. Несмотря на то что удалось добиться бесспорного улучшения топливной экономичности, было ясно, что величина снижения расхода топлива за счет применения ВТЭ будет зависеть от типа двигателя и режима его работы. Поэтому была выполнена оценка других методов снижения расхода топлива с точки зрения их эффективности. Обычно при попытках уменьшить SFOC за счет увеличения угла опережения впрыска топлива выбросы NO_x возрастают. Как показано на рис. 3.23, более ранний впрыск (без ВТЭ) позволил снизить SFOC примерно на 3 %, но выбросы NO_x при этом увеличились на 25 %. Аналогичные результаты были получены при использовании ВТЭ с соотношением W/FO 11, 25 или 43 %.

Далее приведены примеры оптимизации показателей дизеля путем применения мембраны ORM. Как следует из рис. 3.23, увеличение начала впрыска топлива на 3 градуса ПКВ в сочетании с ВТЭ позволило снизить расход топлива на 3 %. Снижение концентрации O_2 до 20 % позволило уменьшить выбросы NO_x примерно на 25 % (см. рис. 3.1, 3.4, 3.5 и 3.22). Увеличение SFOC при этом составило 0,2 % (см. рис. 3.3, 3.6 и 3.22). Применение ORM в сочетании с увеличением угла опережения впрыска на 3 град ПКВ позволило уменьшить SFOC на 2,8 %. Судя по всему, резервы дальнейшего снижения SFOC этим не исчерпываются. Так, при нахождении судна вне зоны ECA SFOC может быть снижен за счет использования ORM-

системы, расходы на содержание которой после установки практически равны нулю. К тому же монтаж данной системы между турбокомпрессором и цилиндрами не представляет никаких проблем — просто надо установить мембрану. Так что для снижения SFOC на несколько процентов при нахождении судна вне зоны ЕСА данный метод вполне пригоден. В результате будут снижены эксплуатационные расходы и улучшен показатель EEDI, определяемый по удельным выбросам CO₂ [г/(тонно-миля)].

Ранее авторами на Конгрессе CIMAC-1998 были представлены тезисы, касающиеся снижения выбросов NO_x при морских перевозках. Целью этого документа было снижение удельных выбросов NO_x [г/(тонно-миля)] от океанского судна, что соответствует концепции EEDI. В обоих случаях для достижения необходимого сокращения выбросов NO_x необходимо снижать коэффициент сопротивления корпуса судна и его скорость, а также увеличивать КПД и шаг винта. На основе данных, полученных в ходе настоящей работы, можно утверждать, что внедрение систем ORM на крупнотоннажных судах позволит снизить выбросы NO_x и улучшить показатель EEDI.

Однако остаются проблемы, которые должны быть решены до того, как эти системы поступят на рынок. Во-первых, должны быть подтверждены показатели устойчивости и надежности ORM, достигнутые при испытаниях на учебных судах NFU. Во-вторых, следует учесть стоимость установки ORM. Если концентрация O₂ устанавливается с помощью ORM на значение 20 %, то при наличии турбокомпрессора с высоким КПД ожидаемая стоимость установки ORM будет минимальной. Однако стоимость установки, как и необходимое для нее место, должны быть приняты во внимание, поскольку эти факторы являются существенными. Чем мощнее двигатель, тем больше ожидаемая экономия расходов на топливо, которая может с запасом окупить стоимость установки. Дальнейшее совершенствование системы ORM также может окупиться за счет повышения ее эффективности.

4. Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Поскольку для корректной работы ORM важен перепад давления на мембране, то повышение давления перед мембраной равносильно снижению давления за ней.
2. Даже при снижении концентрации O₂ до 20 % увеличение SFOC не превышает 0,2 %. Однако при дальнейшем снижении концентрации O₂ рост SFOC более заметен. Он составляет 0,5, 1,5 и 3% при концентрации O₂ 19, 18 и 17 % соответственно.

3. Использование ВТЭ достаточно эффективно с точки зрения снижения выбросов NO_x и черного углерода, однако для выполнения требований IMO Tier III этого недостаточно.

4. При использовании ВТЭ снижается расход топлива, а также выбросы NO_x и РМ, что может быть объяснено с помощью теории распыливания топлива.

5. Совместное использование ВТЭ и ORM позволяет выполнить требования IMO Tier III, при незначительном увеличении расхода топлива.

6. Для оценки надежности и эффективности мембраны ORM были проведены ее испытания на двух находящихся в эксплуатации судах. Эти испытания дали хорошие результаты.

7. Показана возможность снижения SFOC при использовании технологии снижения выбросов NO_x с помощью ORM в сочетании с ВТЭ при нахождении судна за пределами зон ЕСА.

8. Чем мощнее двигатель, тем больше снижение расхода топлива с помощью системы ORM. Аналогичным образом на крупных судах с системой ORM можно добиться одновременного снижения NO_x и EEDI.

9. Чрезвычайно важно то, что упомянутые выше системы используют только воздух и воду, поэтому они абсолютно безвредны для окружающей среды при работе двигателя на любых режимах.

Литература

1. Fujibayashi, T. et al. «Development of Marine SCR System for Large Two-stroke Diesel Engines Complying with IMO NO_x Tier III» CIMAC, 2013, Paper № 29.
2. Soikkeli, S. et al. «Design aspects of SCR systems for HFO fired marine diesel engines» CIMAC, 2013, Paper № 179.
3. Steffe, P. et al. «High Performance Solutions for IMO TIER III — System Integration of Engine and Aftertreatment Technologies as Element of Success» CIMAC, 2013, Paper № 212.
4. Briggs, J., and McCarney, J. «Field experience of Marine SCR» CIMAC, 2013, Paper № 220.
5. Shirai, T. et al. «EGR system Development on MES Test engine 4S50ME-T9» CIMAC, 2013, Paper № 176.
6. Higashida, M. et al. «Newly Developed Combined EGR & WEF System to comply with IMO NO_x Regulation Tier 3 for Two-stroke Diesel Engine» CIMAC, 2013, Paper № 200.
7. Kalsoft, J., and Preem, M. «Development of integrated EGR system for two-stroke diesel engines» CIMAC, 2013, Paper № 219.
8. Tsuda, M. et al. «Development of DPF [Diesel Particulate Filter] with a Regenerator for Marine Diesel Engines» CIMAC, 2013, Paper № 255.
9. Maeda, K. et al. «Reduction of NO_x Emission by 80 % Using the Newly Developed System with a Polymer Membrane in Marine Diesel Engines» CIMAC, 2013, Paper № 423.
10. Maeda, K. et al. «Studies on Reduction of Emissions from Marine Diesel Engine During Voyage» CIMAC 1998, pp. 729–738.

3D-ПЕЧАТЬ – АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ НА МАРШЕ

Alexander Sakotnig,
Alexander Leitner-Audouy,
Stephan Laiminger,
GE Jenbacher

Реферат

Хотя идея 3D-печати не так уж нова, сегодня она переживает, можно сказать, второе рождение. Сегодня наблюдается не только растущий спрос на технологии, позволяющие ускорить макетирование опытных образцов, но и настоящий прорыв в этой области. Снимается целый ряд технологических ограничений, решительно пересматриваются традиционные методы проектирования и изготовления компонентов. Во всех промышленных областях между ведущими производителями развернулась настоящая гонка за лидерство в деле запуска в серию металлических деталей, изготовленных методами 3D-печати.

Для этой технологии не существует большинства ограничений, свойственных традиционным методам проектирования и изготовления деталей.

Компания «General Electric» (GE) чрезвычайно быстрыми темпами внедряет метод аддитивного производства (наслоения) металлических деталей в самых различных областях своей деятельности. В настоящей статье приводится обзор современного состояния технологии 3D-печати и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом. Основное внимание при этом уделяется деталям, относящимся к двигателям внутреннего сгорания и сопутствующей оснастке.

Целью является распространение данной технологии на серийное производство, чтобы при этом наиболее полно использовать все ее возможности. Это значит, что необходимо радикальным образом изменить процесс проектирования, чтобы по максимуму использовать потенциал этой технологии и сделать ее конкурентоспособной по отношению к традиционным методам. В докладе описан весь цикл создания изделия новым методом, от проекта до прототипа, и далее — до серийного образца, а также критерии отбора компонентов — кандидатов для запуска в серию.

Уже сейчас отобрано для запуска в серию огромное количество самых разнообразных узлов и деталей, но это лишь верхушка айсберга. На повестке дня — полный пересмотр с этой точки зрения технологии производства всей существующей номенклатуры изделий на системной основе. Основные кандидаты — это изделия, при обработке которых образуется большое количество отходов, сложные сборки и сварные узлы, а также изделия большой трудоемкости. Попутно

ставится задача снижения (по возможности) производственных затрат. На ближайшее будущее планируется начало опытов с гибридной печатью из материалов различной природы и с разными свойствами, что позволяет прогнозировать выход на новый уровень в использовании всех возможностей данной технологии.

Для ее успеха важно, чтобы процесс проектирования был коренным образом пересмотрен, и чтобы ограничения, которые со студенческой скамьи были вбиты в головы инженеров, перестали существовать.

Введение

Будучи одним из мировых промышленных лидеров, корпорация GE постоянно ищет новые технические решения и инновационные формы организации бизнеса. Это относится к обновлению как выпускаемых изделий, так и технологий их производства. Стремясь максимально сократить цикл разработки и внедрения новой продукции, в 2008 г. была запущена программа «Rapid Prototyping via 3D-printing» (быстрое макетирование с помощью 3D-печати). Эта программа включала в себя интенсивные исследования обратного инжиниринга как инструмента для применения системы расплавленного наложения (Fused Deposition Modeling System), а также создание центра разработок по данной теме (рис. 1). В рамках программы GE по созданию центра компетенции в области аддитивного производства были сделаны крупные инвестиции в строительство лаборатории 3D-печати (рис. 2). Целью этих инвестиций было объединение всех ресурсов, имеющих отношение к аддитивному производству, и формирование новой команды из специалистов по GSCM и технологиям. Церемония официального открытия состоялась в апреле 2015 г. К этому моменту завершились испытания и ввод в эксплуатацию нового 3D-принтера для металлических изделий. (рис. 3)

С самого начала был раскрыт огромный потенциал метода наложения, что привело к решению создать специальную группу для дальнейшего продвижения этой технологии. Был организован центр компетенции, объединивший усилия

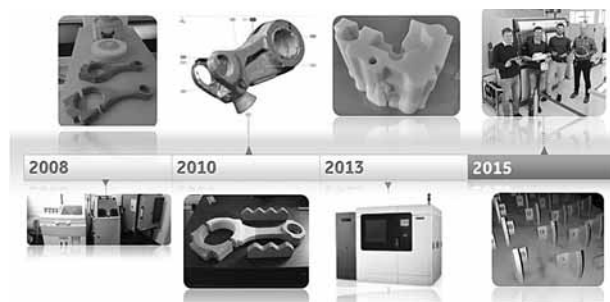


Рис. 1. Прогресс в области аддитивного производства компонентов для газовых двигателей GE — Jenbacher



Рис. 2. Переоборудование существующего цеха



Рис. 3. Новый цех в день торжественного открытия

инженеров-проектировщиков и технологов. Приобретение нового принтера для печати металлических изделий подтвердило намерения инженеров не ограничиваться теоретическими изысканиями, а сразу же приступить к реальному использованию технологии аддитивного производства. Такое междисциплинарное взаимодействие способствовало быстрому усвоению полученных уроков, обмену информацией и опытом, и скорейшему внедрению их в жизнь.

**3D-печать металлоизделий:
основные положения и концепции**

Параллельно с приобретением и освоением нового 3D-принтера для металла проводился интенсивный анализ номенклатуры продукции фирмы в поисках подходящих компонентов. Все это время поддерживался тесный контакт с другими центрами аддитивной технологии GE, поскольку многие из них уже имели опыт освоения этой технологии для других изделий. Выбор принтера с ручной подачей порошка позволил расширить область его возможного применения. В этом случае появляется возможность выбирать самые различные материалы. Наиболее ходовые металлические порошки (как химически активные, так и неактивные) могут обрабатываться с помощью лазерного плавления (наплавки), например, инструментальная сталь, инконель, алюминий, титан, кобальт, хром и HastelloyX.

Необходимые для 3D-печати массивы данных создаются путем импорта из CAD файлов, описывающих геометрию деталей (в формате например, *.stl), в фирменный программный пакет MAGICS. С помощью этого приложения массивы данных переводятся в формат, используемый для печати, и, в случае необходимости, имеется возможность добавить к несущей конструкции новые элементы. Последнее часто бывает необходимо для выполнения и оптимизации печати, повышения жесткости конструкции во избежание деформаций. Затем обработчик печати принтера формирует слои объекта толщиной от 30 до 50 мкм, и рассчитывает параметры работы лазера для каждого прохода, а также общую продолжительность печати.

Основы аддитивной технологии

Первой операцией является предварительный нагрев опорной платформы до температуры порядка 200 °С. После этого, во избежание окисления металлического порошка во время плавки, технологическая камера заполняется азотом. В принципе, печать может вестись без вмешательства оператора. При этом, однако, на рабочем месте всегда должно быть достаточное количество нужных материалов, например, контейнеров для крупных фрагментов. По завершении печати сыпучие остатки могут быть откалиброваны на сите и затем повторно использованы, так как на изготовление компонента пошла только расплавленная часть материала. После этого производится термообработка всей конструкции, включая опорную плиту, для снятия внутренних напряжений. Последняя операция — механическое разобщение всех наплавленных элементов с платформой. Все компоненты, к чистоте поверхности которых предъявляются особо высокие требования, впоследствии проходят дополнительную механическую обработку. Существующее

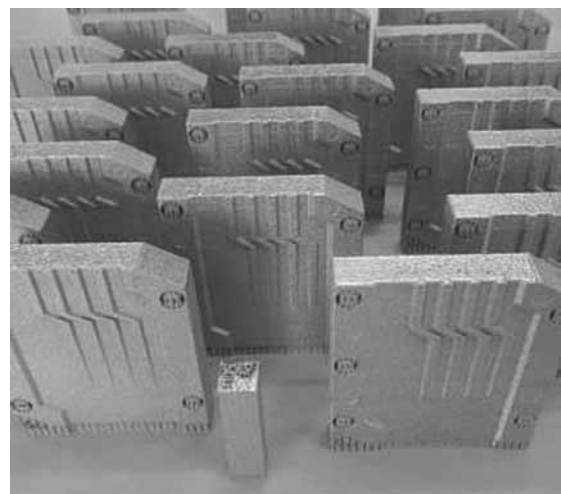


Рис. 4. Контрольные крышки для промежуточного опытного варианта, изготовленные в цеху заказчика

оборудование позволяет обеспечить «средний» класс точности размеров и плотность компонентов >99 % (рис. 4).

Разработчикам без особого труда удалось научить инженеров использовать все преимущества этой многообещающей технологии. В самом начале было сделано несколько учебных образцов и выпущено несколько инструкций общего характера по объемной печати, после чего «процесс пошел» сам собой. Постепенно интерес к технологии аддитивного производства и ее возможностям стало проявлять все большее и большее число специалистов фирмы.

Изучение опыта других подразделений GE в данной области помогло оценить огромный потенциал применения 3D-печати в ходе разработки и изготовления металлических изделий. Возникла необходимость создания корпоративного банка инновационных идей в данной области, который станет базой для широкого внедрения данной технологии. Для ее продвижения были использованы все существующие механизмы пропаганды передового опыта, включая неформальные дни открытых дверей для разных групп, объявления, выводимые на внутренние экраны новостей, и средства онлайн-общения. Все это, в том числе разного рода накладные расходы, является частью работы в рамках австрийской Программы исследований аддитивного производства (www.addmanu.at).

Специалисты компании продолжают учиться, шаг за шагом осваивая новый «аддитивный» образ мыслей.

Общий подход

С первого дня существования центра компетенции в области аддитивной технологии проводилась работа по внедрению 3D-печати в производство газовых двигателей Jenbacher. Степень использования существующего оборудования непрерывно растет, этот показатель постоянно измеряется и регистрируется.

Первым шагом программы стала установка нового принтера для печати изделий из металлического порошка с последующим вводом его в эксплуатацию. После успешной установки и наладки принтера на его штатном месте была выполнена пробная печать нескольких изделий из инструментальной стали 1.2709 по образцу компонентов, сделанных из порошка Inconel 718 на площадке изготовителя в ходе приемо-сдаточных испытаний (рис. 5). Все навыки, полученные в процесс обучения, были использованы для оптимизации технологии печати и позиционирования деталей таким образом, чтобы по возможности сохранять опоры. Во время печати этой первой пробной партии, после нанесения около 200 слоев, произошел отказ.



Рис. 5. Первые опытные образцы различных изделий

Для разбора причин отказа был собран совет из техников по обслуживанию оборудования и членов «аддитивной» команды. В течение дня причина отказа была выявлена. При этом была осознана необходимость разработки детального плана печати.

Самым важным достижением в процессе ввода оборудования в эксплуатацию было определение критериев качества компонентов, необходимых для окончательной приемки оборудования. К числу ключевых критериев относятся, например, пористость (рис. 6), общие допуски и чистота поверхности. Огромная помощь в этом была оказана лабораторией материаловедения. Протоколы материаловедческого анализа позволили в короткий срок завершить ввод машины в эксплуатацию.

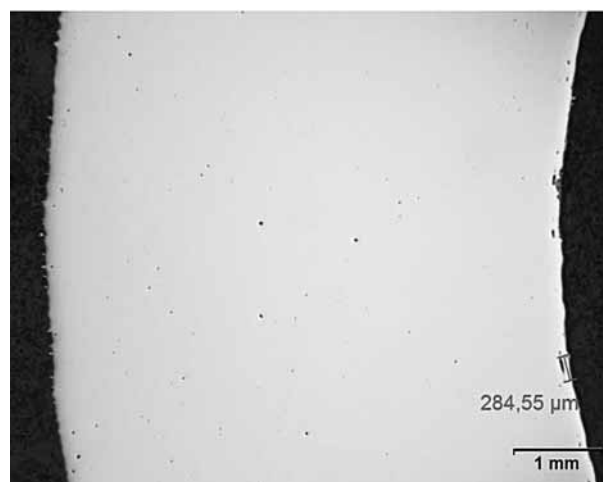


Рис. 6. Материаловедческий анализ — уровень пористости материала EHS

С точки зрения требований EHS (охрана труда, окружающей среды и безопасность) для обеспечения необходимых индивидуальных средств защиты персонала необходимо было предварительно провести весьма детальное и обширное исследование. Прежде всего было необходимо убедиться в выполнении всех соответствующих требований нормативных документов, особенно касающихся безопасности и эргономики при работе с металлическим порошком и непосредственно с 3D-принтером.

С учетом того, что металлические порошки, используемые при изготовлении печатных деталей (Al, Ti, CoCr, Steel, Inconel, ...), отличаются чрезвычайной химической активностью и склонностью к возгоранию, было необходимо принимать во внимание следующие моменты:

- химически активные материалы, такие как титан или алюминий, является пирофорными, т. е. склонными к спонтанному самовозгоранию;
- необходимо устранить все источники потенциального возгорания;
- исключить возможность хранения металлических порошков вблизи взрывоопасных объектов;
- необходимо оборудовать рабочие места огнетушителями класса D для металла;
- необходимо обеспечить строгое соблюдение всех инструкций изготовителя, в том числе мер предосторожности во время смены фильтров, использование средств обеспечения безопасности, принятие всех необходимых мер для успешной реактивации порошка;
- процесс печати сопровождается выделением большого количества тепла, что может привести к ожогам;
- существует опасность вдыхания персоналом частиц порошка размером 10–65 мкм;
- при работе с порошками алюминия и титана в качестве инертного газа необходимо использовать аргон, в остальных случаях можно использовать азот;

Безопасность технологии была обеспечена консультациями со специалистом в области EHS относительно оценки рисков при работе с порошками и самим принтером.

Обзор деятельности GE в области аддитивного производства

Приняв для себя решение и выработав четкую стратегию, корпорация GE с самого начала приступила к инвестированию в аддитивное производство, и в течение последних двух лет размеры инвестиций были весьма существенными. Эта технология была принята различными бизнес-сегментами корпорации и Глобальным исследовательским центром корпорации GE, которая стала мировым лидером в данной области.



Рис. 7. Центр САТА — Питтсбург, Пенсильвания

К 2020 г. авиационным подразделением корпорация (GE Aviation) с помощью 3D-печати будет произведено порядка 100 000 деталей. В настоящее время во всех подразделениях GE используется более 300 3D-принтеров.

В последнее время появилось множество сообщений об успешном опыте производства металлических компонентов на предприятиях с помощью 3D-печати. В данный момент разворачиваются два больших проекта, реализация которых поможет скоординировать работы в этом направлении, ведущиеся различными подразделениями.

В Питтсбурге, Пенсильвания (рис. 7) GE собирается построить крупный Центр по продвижению аддитивной технологии (САТА). Он станет флагманом аддитивных производств GE, который будет находиться на передовом крае внедрения 3D-печати во всех подразделениях компании. Он должен стать средоточием инноваций, организовать подготовку специалистов и обеспечить дальнейшее развитие как конструкторских работ, так и применения этой революционной технологии. Центр будет поддерживать подразделения GE, работающие в области авиации, медицины, освещения, нефти и газа, электричества, транспорта и организации энергоснабжения.

В Гринвиле (Южная Каролина), SC GE Power оборудует еще один Центр такого же типа. Он будет ориентирован преимущественно на непосредственное внедрение данной технологии в практику, а также на помощь в выборе номенклатуры изделий и запуске в серию. В ближайшем будущем планируются крупные инвестиции в расширение производственных площадей, приобретение оборудования и создание порядка 80 новых рабочих мест.

Кроме того, существует высокотехнологичный центр GE по 3D-печати в Европе. Команда GE Birt имеет более чем 15-летний опыт по применению 3D-печати в производстве деталей газовых турбин.

Общие рекомендации по технологии, позиционированию деталей и стратегии наплавки

Поначалу кажется, что новая технология открывает поистине неограниченную свободу кон-

структурских решений, однако в реальности количество ограничений достаточно велико. Тем не менее, во многих случаях существует возможность эти ограничения так или иначе обойти. Например, во время одного из первых сеансов печати во время пусконаладочных работ при нескольких первых проходах оказалось нарушенным соединение между опорной конструкцией и опорной плитой, в результате чего было повреждено первое сопло восстановителя защитного покрытия. При «разборе полетов» было выявлено несколько возможностей для исправления обнаруженных дефектов, а именно:

- перед началом печати необходимо проверять / измерять уровень влажности порошка, причем влажность металлического порошка может быть существенно снижена путем установки нескольких (постоянных) поглотителей влаги в бункере для порошка;

- иногда можно наблюдать, что порошок не пристает к опорной плите из-за слишком сильной ее намагниченности, поэтому после каждой операции по механической обработке поверхности (шлифовка или пескоструйная обработка) требуется ее размагничивание (перевод в диамагнитное состояние);

- качество контакта с опорной плитой напрямую зависит от толщины первого слоя; причем слишком большая толщина первого слоя приводит к ухудшению качества контакта между слоями;

- необходимо выбирать оптимальное положение детали и использовать безопорные области.

Если угол наклона поверхности превышает 45° , возникает опасность минимального контакта с опорной плитой (рис. 8). Если несущая способность опорной конструкции недостаточна, то для улучшения качества контакта с опорной плитой следует увеличить площадь опоры или применить анкерное крепление. Это необходимо также для улучшения теплоотвода от детали к плите (рис. 9).



Рис. 8. Потеря контакта с опорной плитой

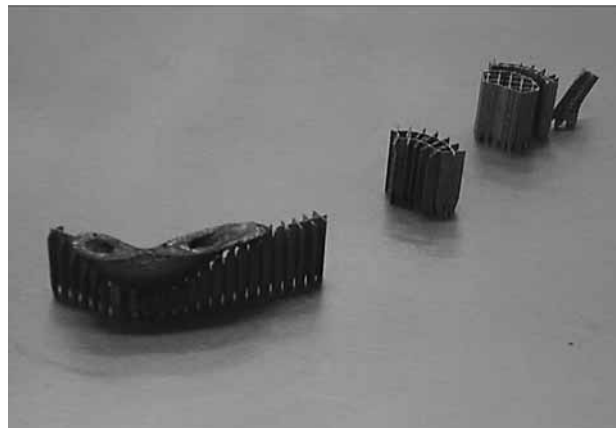


Рис. 9. Ухудшение теплоотвода к опорной плите

Существует целый ряд индивидуально настраиваемых параметров, специфичных для каждого конкретного применения. Значительная часть курса обучения посвящена программным ограничениям, свойственным каждому виду печатных компонентов, и способам их обхода. Это означает, что операторам, если они хотят чтобы принтер функционировал без сбоев, нужно проводить большую подготовительную работу для каждого вида деталей. В общем случае необходимо начинать с программы для обработки порошка инструментальной стали 1.2709, которая используется поставщиком принтера. При этом в ходе приемки машины нужно было изготовить деталь из материала Inconel 718 (у поставщика), а затем — из стали 1.2707 (на месте установки) (рис. 10).

Программы испытаний для различных деталей предусматривают проверку целого ряда параметров, таких как чистота поверхности, твердость, пористость, допуски и т. д. Такая проверка на соответствие указанным требованиям была проведена в течение нескольких дней после контрольной печати. Система подтвердила, что можно напечатать детали в соответствии со спецификациями материалов и техническими условиями поставщика машины. Еще одним важным шагом стала

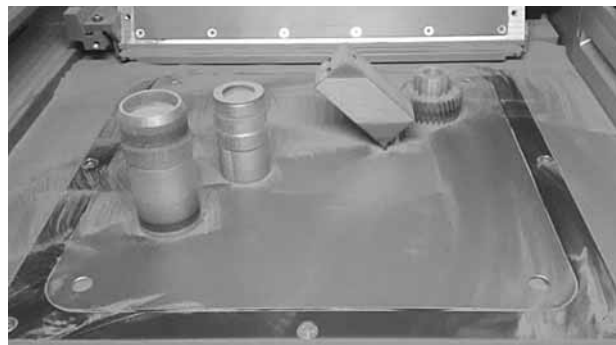


Рис. 10. Приемосдаточные испытания машины на месте установки

проверка системы на экологическое соответствие («green tag check») и проверка производственной площадки, только что переоборудованной в цех 3D печати, на соответствие званию лидера в области охраны окружающей среды и безопасности. Для этого потребовалось лишь уточнить некоторые процедуры и правила эргономики.

В ходе первой серии пробных / учебных испытаний было изготовлено множество копий самых различных компонентов. Был выполнен целый ряд заданий по печати простых и сложных деталей, с целью максимально быстрого обучения проектированию печатных компонентов, программированию системы, заданию параметров процессора и принтера.

Вообще говоря, это не самый эффективный способ обеспечить высокое качество продукции, но он позволяет быстро обучить персонал, как учитывать все необходимые факторы при проектировании, а также открывает невероятное разнообразие деталей, которые данным способом можно сделать из инструментальной стали. На примере печати сложных компонентов удалось познакомить с этим методом специалистов в масштабах всей корпорации и привлечь к нему больше внимания. Используя различные каналы для распространения данной информации, наши коллеги из разных подразделений стали активно предлагать свои идеи.

В результате было получено множество предложений, о которых также были проинформированы все подразделения компании. Например, предложен метод оценки эксплуатационной пригодности нового измерительного оборудования, а также составлен большой список серийно выпускаемых деталей двигателей внутреннего сгорания, для производства которых технология 3D-печати могла бы стать предпочтительной. Кроме того, появилось множество новых идей как свидетельство креативности и того образа мыслей, который необходим для аддитивной технологии. Оба подхода имеют право на жизнь. Креативные модели, демонстрирующие «аддитивное» мышление наших коллег, свидетельствуют не только об их готовности к продвижению новой технологии, но и подают хороший пример остальным членам команды.

Новый подход к конструированию

Правильный выбор технологии оказывает огромное влияние на сам процесс конструирования, выбор материалов, допусков и точности, на общие правила проектирования и даже на нормативную базу. Для каждой технологической операции существуют определенные инструкции или правила, соблюдение которых обеспечивает нужные технические и экономические характеристики изделия.

Все уже слышали о том, что с помощью аддитивной технологии или 3D печати можно изготовить деталь любой формы, какую только можно себе представить. Теперь, с учетом достаточно длительного опыта использования данной технологии, можно сказать, что это утверждение несколько преувеличено. Существуют определенные правила, которые необходимо соблюдать при использовании этой технологии, имеющей к тому же свои неочевидные особенности и ограничения. Нельзя просто взять и напечатать любой компонент традиционной конструкции. Для этого его конструкция должна быть оптимизирована в соответствии с *новыми* правилами проектирования. Вот несколько примеров.

➤ Даже при первом знакомстве с процессом становится очевидным, что следует избегать закрытых и малодоступных объемов, или же должна быть обеспечена возможность их очистки от порошка после печати, что само по себе требует времени.

➤ Модель не должна содержать плоских «крыш» или свесов с углом наклона $<45^\circ$. Их можно будет напечатать с соответствующими поддерживающими элементами, но последующее удаление этих элементов — процесс достаточно сложный и длительный.

➤ Все сопряжения должны выполняться очень осторожно, так как переход между более толстым и более тонким элементами создает ступеньку, а острые углы являются концентраторами напряжений.

➤ Чистота поверхности детали после печати невелика, примерно такая же, как после литья иликовки. Если нужна более высокая чистота поверхности, то, возможно, потребуются дополнительная механическая обработка.

➤ Поскольку детали печатаются или «фиксируются» на металлической плите, являющейся для них опорой, при подготовке печати надо обязательно учитывать пространственную ориентацию детали. Чем больше площадь опорной плиты, тем лучше.

➤ Размеры деталей ограничены размерами оборудования, которые в последние годы непрерывно увеличиваются.

➤ Части гибридных компонентов должны иметь горизонтальные соединительные поверхности, которые будут привариваться к вашей печатной детали.

Пожалуй, самое трудное — научить инженеров мыслить категориями 3D-печати и привить им вкус к технологии, где есть свои ограничения, но их все же меньше, чем обычно. Все приемы конструирования, как и существующие ограничения, должны быть пересмотрены и переосмыслены, может быть, даже изобретены заново.

Выбор компонентов для аддитивной печати

Если учесть вес и размеры деталей, становится понятно, что границы экономической целесообразности будут достигнуты очень скоро. Возникла необходимость внимательно и всесторонне рассмотреть процесс выбора компонентов, совместимых с требованиями аддитивной технологии. Здесь желателен системный подход к выбору компонентов, пригодных для 3D-печати, не упуская из виду (в конечном итоге) перспективу их постановки на серийное производство.

Например, для 3D-печати очень подходят компоненты, традиционно приготовленные с применением интенсивной механической обработки (когда в ходе механической обработки удаляется примерно 70–80% исходного материала). Главное здесь то, что при использовании 3D-печати сокращается время изготовления изделия, и нужна лишь добавка материала. Учитывая существующие на сегодняшний день ограничения, связанные с размерами оборудования и скоростью наплавки, желательно по возможности начинать с небольших деталей.

Сложные системы или сварные узлы (рис. 11), для изготовления которых требовались дорогостоящие приспособления, теперь могут быть заменены одной деталью. Поднутрения также не являются проблемой, учитывая большой выбор имеющихся технологий.

Другой пример — гибридные конструкции, в которых обычно печатная деталь используется в качестве опоры или фиксатора основной функциональной детали или компонента, как правило, достаточно сложной формы. Здесь идея состоит в том, чтобы для несущего элемента



Рис. 11. Сложные сварные узлы

использовать дешевый материал, обрабатываемый традиционным способом. Сложный или высоконагруженный элемент конструкции дополняется печатной деталью и становится частью гибридного компонента.

Примеры использования

Все подразделения фирмы проявили значительный интерес к организации производства деталей на новом оборудовании. Этот интерес подогревался сообщениями о том, что никаких ограничений на форму деталей теперь не существует. Рассматривались любые идеи, обещавшие успех и быстрый реальный результат. В каждом случае нужно было оценить правила конструирования системы, определить присущие ей ограничения и слабые места. Критерием отбора была способность принтера выполнять различные детали для комбинированных компонентов, например, крышку для защиты от возникающих при сварке брызг (рис. 12).

Исходя из конструкции крышки первоначально предполагалось выполнить ее целиком методом FDM, но это оказалось не лучшим решением, учитывая интенсивные термические напряжения, которым подвергается эта деталь. Решение объединить обычную технологию, методы FDM и DMLM позволило получить композитную конструкцию, удовлетворяющую всем техническим требованиям. Таким образом, каждый раз выбирался метод изготовления, который для данной конструкции был признан наиболее целесообразным.

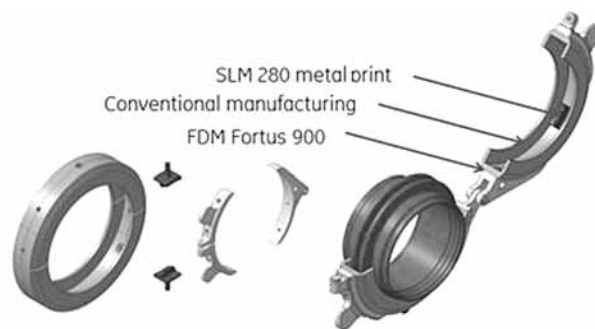


Рис. 12. Комбинированная защитная крышка



Рис. 13. Загрузочная воронка облегченного типа

Еще один пример удачного выбора детали — простая загрузочная воронка с отдельным уплотнением из стального прутка весом $\rightarrow \sim 8$ кг (рис. 13) где велик объем идущего в стружку материала.

Аддитивное конструирование позволяет реализовать легкий вариант этого изделия (из алюминия), весящий всего около 0,5 кг, также с возможностью вставки уплотнения. Впрочем, если планировать запуск его в серию, то, учитывая характеристики существующей системы (один лазер мощностью 400 Вт), можно ожидать, что себестоимость его удвоится, но зато аддитивные детали имеют целый ряд других преимуществ. Следует учесть такие факторы, как:

- сокращение времени на освоение новой продукции;
- снижение стоимости хранения;
- печать по мере необходимости;
- уменьшение числа этапов сборки;
- оптимизацию логистики.

Цикл создания нового изделия становится все короче и короче, соответственно, все меньше времени отводится на подготовку опытного образца к испытаниям. Аддитивная технология позволяет существенно ускорить создание прототипа. Раньше нередко возникали ситуации, когда сложные литые или кованные компоненты приходилось перепроектировать для изготовления сварного или полностью механически обработанного «двойника», чтобы как можно скорее провести функциональные испытания. При этом неизбежны были многочисленные ограничения и компромиссы. Сегодня с помощью 3D аддитивного производства появилась возможность оперативного макетирования (рис. 14), используя тот материал и придавая ему такую форму, которые наиболее близки к исходным техническим требованиям. Ценность функциональных испытаний возрастает, поскольку компонент по всем параметрам оказывается максимально приближен к серийному изделию. Аддитивная технология позволяет снизить затраты за счет отказа от дорогостоящей механической обработки, а также — за счет ранее упомянутого сокращения времени на освоение новой продукции.

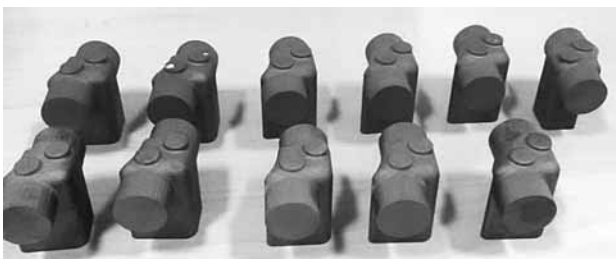


Рис. 14. Макеты изделий для функциональных испытаний на двигателе

Примером изделия, изготовленного методом 3D-печати и уже поставленного на серийное производство, является небольшая по размерам деталь, изготовление которой достаточно трудоемкое и дорогостоящее. Деталь, о которой идет речь, применяется при техобслуживании газового двигателя. Она является замечательным примером того, как возможности технологии меняют сам процесс мышления. Вместо поиска более сложных путей решения проблемы за счет изменения формы детали, производимой механической обработкой, с успехом была применена технология 3D-печати. Подобные примеры или иллюстрации еще не раз понадобятся для того, чтобы развивать у инженеров аддитивное мышление (рис. 15 и 16).

Еще одна весьма перспективная область возможного применения — разработка программных средств для оптимизации топологии. Такие программы обычно не учитывают моменты, связанные с технологией изготовления. 3D-печать представляется наиболее подходящей технологией для воспроизведения подобных сложных структур с помощью чисто физического подхода, заложенного в такие программы оптимизации.

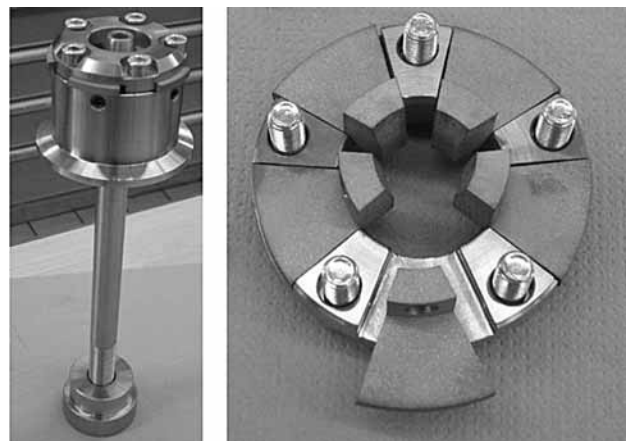


Рис. 15. Инструменты — постановка на серийное производство

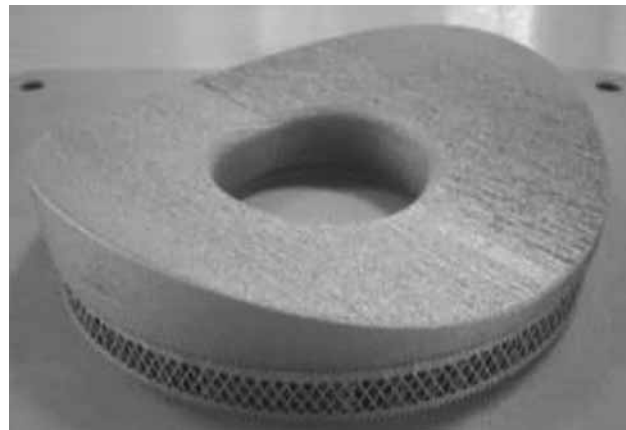


Рис. 16. Детали для гибочного инструмента

Определение пост-обработки / контроль качества

В сущности, печать представляет собой лишь один из многих шагов в процессе создания качественных деталей, которые могут пойти в серию. Есть еще целый ряд шагов, которые необходимы, чтобы можно было убедиться в достижении целевых показателей качества.

Самое главное — это термообработка каждой напечатанной детали и точное соблюдение порядка операций (например, полная очистка от остатков порошка после печати, или удаление компонентов, которые должны быть отрезаны от несущей платы перед термообработкой).

Важнейшая операция — это проверка качества, поскольку существует множество факторов, напрямую связанных с качеством детали. Например, за время трехнедельного технологического перерыва из оборудования не удалялся порошок. После включения принтера и печати с тем же порошком отправили печатные детали на материаловедческий анализ. Оказалось, что за это время значительно возросла пористость материала — до ~50 мкм.

Перспективы

Быстрый успех и прекрасные результаты в изготовлении методом 3D печати опытных образцов, инструментов, гибридных деталей, запчастей для двигателей заказчика, а также попутные конструктивные усовершенствования позволяют надеяться на то, что серийное производство деталей двигателей аддитивным методом начнется очень скоро. При этом данную технологию целесообразно использовать наряду с другими. До сих пор, несмотря на многочисленные сообщения с налетом сенсации о возможностях 3D-печати, ее использование в производстве остается весьма ограниченным, поскольку она достаточно дорогая. Это широко известный факт и крайне важно сейчас сосредоточить усилия на создании такого оборудования, которое поможет решить эту проблему. Сегодня наблюдается стремительный рост показателей 3D-принтеров, в которых увеличивается число лазеров, растет их мощность, точность и эффективность контроля качества при печати. Команда специалистов по аддитивным технологиям занимается теми проектами, которые имеют наибольшие шансы пуска в серию. Идет интенсивный подбор деталей двигателей, которые можно изготовить из сплава Inconel для 3D-печати и организацией их производства. Это прекрасная возможность воспользоваться всеми преимуществами аддитивной технологии для увеличения ресурса деталей, их прочности и термостойкости.

Еще одно приоритетное направление — это ускорение исследований в области гибридной печати. Использование традиционных технологий в сочетании с возможностью делать детали сложной формы, применяя 3D-печать только там, где это диктуется спецификой применения, позволяет уменьшить число компонентов, существенно снизить трудозатраты и себестоимость. Для этого нужно оптимизировать процесс систематического отбора компонентов двигателей, наиболее подходящих для производства с помощью 3D-печати. Часть критериев отбора уже сформулирована, теперь настало время проверки созданной модели.

Утилизация химически активных материалов, таких как алюминий, должна стать еще одним шагом в направлении перехода к аддитивному производству таких деталей, которые в настоящее время дают огромный объем отходов, имеют большое количество модификаций с небольшими конструктивными отличиями и производятся небольшими сериями.

Здесь ключевое условие успеха — приучить инженеров к тому, чтобы дважды подумать, прежде чем приступить к проектированию, а также оценить возможности использования 3D-печати как альтернативной технологии, разработки гибридного изделия и оптимизации конструкции. Высокомотивированные команды специалистов и наличие нескольких центров компетенций позволяют надеяться, что организация аддитивного производства в GE вскоре станет еще одним примером успешного внедрения этой технологии.

Термины и использованные сокращения

GE	General Electric
GSCM	Управление глобальными цепями поставок (Global Supply Chain Management)
EHS	Экология, охрана здоровья, безопасность (Environmental, Health and Safety)
Гибридные детали	Метод изготовления — непосредственная наплавка/сварка на заготовках
CATA	Центр развития аддитивных технологий (Center for Additive Technology Advancement)
FDM	Расплавное наложение (Fused Deposition Modeling)
DMLM	Прямое лазерное спекание металла (Direct Metal Laser Melting)
HastelloyX	Зарегистрированная торговая марка HAYNES INTERNATIONAL INC
MAGICS	Зарегистрированная торговая марка Materialise N.V.

Литература

1. Аддитивное производство GE <http://www.ge.com/stories/advanced-manufacturing>

УДК 621.43.01

Малозёмов А.А., Кукис В.С., Гимазетдинов Р.Р. Разработка математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневых ДВС // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 3–9.

Ключевые слова: поршневые двигатели, математическая модель, программное обеспечение, рабочие процессы, системная динамика.

Представлены результаты работ по созданию математической модели и программного обеспечения для имитационного моделирования поршневого ДВС. Модель основана на методе энергетического и массового баланса, теории бондграфов и представляет собой библиотеку элементов, описывающих процессы в системах и механизмах двигателя. Созданные математическая модель и программное обеспечение обеспечивают высокую скорость, достоверность и точность расчета, что подтверждено экспериментальными данными. Ил. 5. Библ. 17.

УДК 621.78

Иванов Д.А., Зюкин В.С., Колосков А.А. Изменение механических свойств элементов конструкции авиационной техники под действием нестационарных дозвуковых воздушных потоков // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 10–13.

Ключевые слова: авиационные двигатели, нестационарные воздушные потоки, элементы конструкции, изменение механических свойств, методы упрочнения.

Представлены результаты исследования изменения механических свойств металлических конструктивных элементов авиационной техники и авиационных двигателей при воздействии нестационарных воздушных потоков. Найдены оптимальная продолжительность и интенсивность обработки. Показано, что методы повышения механических свойств элементов конструкции воздушных судов с использованием нестационарных воздушных потоков применимы не только при их изготовлении, но и в процессе эксплуатации, технического обслуживания и восстановительного ремонта. Табл. 2. Ил. 3. Библ. 10.

УДК 631.443

Плотников С.А., Зубакин А.С. Анализ процесса сгорания генераторного газа и его смеси с бензином в поршневом двигателе // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 14–18.

Ключевые слова: альтернативная энергетика, генераторный газ, смесевое топливо, индикаторная диаграмма, эффективные показатели, экономия нефтяного топлива.

Приведены результаты стендовых испытаний двигателя 1Ч6,8/5,4 с искровым зажиганием при работе на бензине, генераторном газе и их смеси. Определены регулировочные, экономические и эффективные показатели при работе двигателя по нагрузочным и скоростным характеристикам. Выполнена обработка индикаторных диаграмм двигателя с построением характеристик тепловыделения. Установлено, что при замещении до 70 % бензина генераторным газом снижается его теплонпряженность и улучшаются экологические показатели. Ил. 7. Библ. 8.

УДК 355.673:621.182/621.18

Смирнов А.В., Бондарев А.В., Александров С.В., Болбышев Э.В. Разработка дизельных теплоэлектростанций с активными котлами-утилизаторами высокотемпературного кипящего слоя // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 19–23.

Ключевые слова: дизельные теплоэлектростанции, активные котлы-утилизаторы, твердое топливо, повышение эффективности котла, снижение вредных выбросов.

Представлен обзор технических решений конструкции силовой установки с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя. Разработана математическая модель и получены расчетные технические характеристики теплоэнергетической установки с подачей отработавших газов дизель-генератора в топочное устройство котла. Показана возможность повышения эффективности твердо-

топливного котла и снижения выбросов вредных веществ при сохранении тепловой мощности комбинированной теплоэнергетической установки. Ил. 7. Библ. 6.

УДК 355.673:621.182/621.18

Бондарев А.В., Болбышев Э.В., Смирнов А.В. Автоматизация угольных котлов малой мощности с топками высокотемпературного кипящего слоя и рециркуляцией дымовых газов // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 24–28.

Ключевые слова: твердотопливные котлы, высокотемпературный кипящий слой, автоматизация процесса горения, рециркуляция дымовых газов.

Рассмотрены перспективы применения автоматизированных твердотопливных котлов малой мощности, работающих по технологии высокотемпературного кипящего слоя (ВТКС) с рециркуляцией дымовых газов. Методами численного моделирования исследованы динамические характеристики котлов (ВТКС) при различных возмущающих воздействиях. Показано, что процесс горения твердого топлива в котлах ВТКС с рециркуляцией дымовых газов, в сравнении с котлами без рециркуляции, характеризуется улучшением параметров переходных процессов. Ил. 4. Библ. 6.

УДК 629.3.014.2.017

Дунаев А.В., Пустовой И.Ф. Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании геомодификаторов трения // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 29–34.

Ключевые слова: поршневые ДВС, безразборный ремонт, геомодификаторы трения, триботехнические покрытия, механизм образования и наращивания покрытий.

Рассмотрены различные триботехнические составы для безразборного ремонта изношенных сопряжений трения деталей различной техники, в том числе поршневых ДВС, на основе высокодисперсных порошков минералов группы серпентинов или геомодификаторов трения (ГМТ). Выполнен анализ структуры и свойств покрытий на поверхности восстановленных деталей, предложена гипотеза образования триботехнических покрытий на основе ГМТ в маслах и смазках. Ил. 7. Библ. 8.

УДК 621.43

Новые технологии в двигателестроении (материалы конгресса СИМАС-2016) // Двигателестроение. — 2018. — № 3. — С. 35–54.

Ключевые слова: дизели, выбросы NO_x , полимерные мембраны, снижение кислорода во впускном воздухе, водотопливная эмульсия, детали сложной формы, метод 3D-печати, металлические порошки, послойное лазерное наплавление.

В обзоре представлены новые технологии, направленные на решение актуальных проблем двигателестроения в областях снижения вредных выбросов в атмосферу и ресурсосбережения при изготовлении деталей сложной формы методом 3D-печати. Фирма «Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Япония) результаты исследований системы снижения выбросов NO_x дизелей за счет уменьшения концентрации кислорода во впускном воздухе при использовании специальной полимерной мембраны (ORM — oxygen reduction membrane). В целях обеспечения требований IMO Tier III по выбросам NO_x система ORM дополнена установкой приготовления стабильной водотопливной эмульсии (ВТЭ).

Освоение 3D-печати компонентов двигателей из металлических порошков с послойным лазерным наплавлением позволяет снять целый ряд технологических ограничений при проектировании и изготовлении деталей двигателей сложной формы. Компания «General Electric» (GE) приводит обзор современного состояния развития технологии 3D-печати в своих производственных подразделениях и критериев выбора компонентов, намечаемых для постановки на серийное производство данным методом.

Перевод выполнен к.т.н. Г. Мельником

Табл. 2. Ил. 44. Библ. 11.

UDC 621.43.01

Malozymov A.A., Kukis V.S. and Ghimazetdinov R.R. Mathematical model and software for reciprocating engine simulation // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 3–9.

Keywords: reciprocating engine, mathematical model, software, combustion, system dynamics.

The authors developed original mathematical model and software for reciprocating engine simulation. The model is based on energy & mass balance method, and bond graph theory. Basically, it is the library of elements, which describe processes in engine systems and mechanisms. The model and software in question overperform known state-of-art analogs in terms of computational speed, reliability and precision, which is verified by comparative tests. They enable conjugate simulation of steady-state and transient multidomain processes in various systems and mechanisms of a reciprocating engine. 5 ill., 17 ref.

UDC 621.78

Ivanov D.A., Zyukin V.S. and Koloskov A.A. Nonstationary subsonic air currents as a factor affecting mechanical properties of aircraft components // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 10–13.

Keywords: aircraft engine, nonstationary air current, aircraft component, mechanical degradation, hardening methods.

The authors investigated changes in mechanical properties of aircraft components exposed to nonstationary air currents. The results of the investigation enabled them to optimize duration and intensity of mechanical treatment of said components. Considered methods of aircraft component hardening are shown to be applicable not only in manufacturing technologies, but also for maintenance and repair. Long-term exposure to nonstationary air currents is demonstrated to result in mechanical degradation of aircraft components. 2 tables, 3 ill., 10 ref.

UDC 631.443

Plotnikov S.A. and Zubakin A.S. Combustion of generator gas and its mixture with gasoline in a reciprocating engine // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 14–18.

Keywords: alternative energy sources, generator gas, mixed fuel, indicating diagram, effective performance indices, petrol fuel saving.

The article discusses the results of stand tests of spark ignition engine type 1CH6,8/5,4 operating alternatively on gasoline, generator gas and their mixture. Dependences of performance indices on engine speed and load have been determined. Based on indicating diagrams heat release curves have been traced. As it happened, up to 70 % gasoline may be substituted for generator gas with no appreciable decrease in effective performance indices, emission and thermal stress characteristics being definitely improved. 7 ill., 8 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

Smirnov A.V., Bondarev A.V., Alexandrov S.V. and Bolbyshev E.V. Development of diesel power plants with active waste heat boilers featuring high-temperature fluidized bed // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 19–23.

Keywords: diesel power plant, active waste heat boiler, solid fuel, high-temperature fluidized bed, exhaust gas heat recovery, improvement of boiler efficiency, emission reduction.

Presented is a review of known solutions for power plant with active waste heat boilers featuring high-temperature fluidized bed. The authors developed mathematical model and calculated parameters of power plant featuring exhaust gas injection into the boiler furnace. Possibility of improvement in solid fuel boiler efficiency and emission reduction without compromising plant heat power is shown. 7 ill., 6 ref.

UDC 355.673:621.182/621.18

Bondarev A.V., Bolbyshev E.V. and Smirnov A.V. Automation of low-powered boilers featuring high-temperature fluidized bed and flue gas recirculation // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 24–28.

Keywords: solid fuel boiler, high-temperature fluidized bed, combustion controls, flue gas recirculation, disturbances, transient performance.

Application prospects and possible ways of efficiency improvement for low-powered boilers featuring high-temperature fluidized bed (HTFB) and flue gas recirculation are considered. Transient characteristics of HTFB boilers in response to various disturbances are plotted by means of numerical modelling. It is shown that solid fuel combustion characteristics in HTFB boilers featuring flue gas recirculation are definitely better than those in no-recirculation boilers. In particular, HTFB boilers demonstrate shorter response time and transient period, with optimum excess air ratio. 4 ill., 6 ref.

UDC 629.3.014.2.017

Dunaev A.V. and Pustovoy I.F. Mechanism of formation of antifriction coating with geomodifiers // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 29–34.

Keywords: reciprocating engine, no-dismantle repair, friction geomodifiers, antifriction coatings, coating composition and properties, mechanism of coating formation and building-up.

Considered are a number of antifriction compositions for no-dismantle repair of worn-out contact surfaces of various machines, including reciprocating engines, based on fine-grained powder from mineral serpentines or friction geomodifiers (FGD). Structure and properties of coatings on rebuilt parts were studied, whereupon a hypothesis of FGD-based coatings formation on engine parts exposed to lube oil was offered. Said hypothesis accounts for coating build-up even after FGD is removed from lube oil. 7 ill., 8 ref.

UDC 621.43

Modern technologies in engine building (based on CIMAC-2016 papers) // Dvigatelistroyeniye. — 2018. — № 3. — P. 35–54.

Keywords: diesel engine, NO_x emissions, polymer membrane, oxygen reduction, water mixed fuel, nano-level disperse water phase, complex components, 3D-printing, metal powder, laser additive manufacturing, design methods.

The review covers new engine building technologies that contribute into emission reduction and resource saving when manufacturing complex components on 3D-printer.

«Asahi Kasei Chemicals Corporation» (Japan) presented the results of testing the NO_x reduction system that decreases the oxygen concentration in the intake or scavenging air using a special polymer membrane (ORM — oxygen reduction membrane). In order to secure compliance with IMO Tier III specifications for NO_x emissions, ORM system was added with a newly developed water mixed fuel (WMF) system, in which the fuel is mixed with water just prior to the fuel injection device, generating steady combustion without additives by reducing the droplet size to the nano-level.

Implementation of 3D-printing (metal additive) technology enabled us to break boundaries of conventional design and manufacturing, particularly when it comes to parts of sophisticated geometry. «General Electric» (GE) provides the review of today status of metal additive manufacturing in its branches, and identifies criteria for components targeted for serial production with said method. According to GE, crucial for the success of this technology is to re-imagine the design process and close out boundaries that has been forced into the heads of the engineers.

The CIMAC papers are translated into Russian by G.Melnik, PhD. 2 tables, 44 ill., 11 ref.