

## КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ СУДОВОГО ДИЗЕЛЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ (материалы конгресса CIMAC 2013)

*Масаки Окубо, Такуя Кувахара, Масаши Каваи, Томоюки Куроки, Университет префектуры Осака, Япония  
Киеииро Йошида, Технологический институт, Япония  
Кеничи Ханамото, Казутоши Сато, «Дайхатсу дизель МФГ», Япония*

Доклад, подготовленный группой специалистов Университета Osaka и фирмы «Daihatsu Diesel MFG. Co., Ltd.» (Япония), посвящен работам по созданию системы очистки отработавших газов судового дизеля от  $\text{NO}_x$  и частиц с использованием холодной плазмы. Суть метода сводится к восстановлению  $\text{NO}_x$  на сорбенте и при обработке их холодной плазмой, вырабатываемой генераторами под действием высоковольтных разрядов. Эффективность очистки газов в системе обеспечивается его периодичностью, включающей последовательные циклы адсорбции и десорбции  $\text{NO}_x$  сорбентом.

К достоинствам технологии относятся:

> высокая эффективность очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$ ;

> отсутствие дорогостоящих (на основе благородных или редкоземельных металлов) катализаторов, не совместимых с высокосернистыми топливами;

> отсутствие восстанавливающих реагентов с токсичным аммиаком или мочевиной.

Показано, что опытный судовой дизель мощностью 1100 кВт при 900 об/мин, оборудованный подобной системой очистки, может обеспечить требования IMO Tier 3 по выбросам  $\text{NO}_x$  без каких-либо изменений в рабочем процессе.

Качество работы системы оценивается показателем энергоэффективности очистки, вычисляемым как отношение количества восстановленных  $\text{NO}_x$  к энергии, потребляемой генератором плазмы. Максимальная потребляемая мощность реактора не превышает 5 % от мощности двигателя.

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

### РЕФЕРАТ

Выполнение перспективных норм выбросов  $\text{NO}_x$  только за счет совершенствования процесса сгорания в дизеле становится весьма проблематичным, поэтому все большее внимание уделяется поискам рациональных технологий газоочистки. Настоящее исследование посвящено созданию эффективной системы очистки отработавших газов одновременно от твердых частиц (PM) и окислов азота ( $\text{NO}_x$ ) с помощью технологии, использующей холодную плазму (nonthermal plasma — NTP). Преимущество предлагаемой технологии по сравнению с селективной ката-

литической очисткой (selective catalytic reduction — SCR) состоит в том, что процесс протекает при низких температурах (менее 150 °С), без использования таких экологически опасных компонентов, как раствор мочевины и катализаторы на основе тяжелых металлов. Система газоочистки состоит из следующих основных компонентов: судовой дизель, камера поглощения  $\text{NO}_x$  с гранулированным сорбентом, NTP-реактор и фильтр частиц (diesel particulate filter — DPF). Процесс газоочистки включает в себя следующие стадии: поглощение (адсорбция), выделение (десорбция) и восстановление  $\text{NO}_x$  в реакторе холодной плазмы.

Одновременно с этим ведется регенерация фильтров DPF с использованием озона  $\text{O}_3$ , образующегося под воздействием плазмы.

### ВВЕДЕНИЕ

Как известно, дизельные двигатели обладают целым рядом достоинств, в частности компактностью и высоким КПД, при достаточно высокой полезной мощности. Они, однако, не лишены недостатков, одним из которых является наличие вредных выбросов, включая твердые частицы (PM) и окислы азота  $\text{NO}_x = (\text{NO} + \text{NO}_2)$ . Поэтому последние годы были отмечены интенсивным развитием методов газоочистки [1] как наиболее эффективного средства снижения вредных выбросов.

Для удаления PM в двигателях автомобилей и дорожно-строительных машин широко используются фильтры частиц (DPF) из металлических пластин, карбида кремния или кордиеритовой керамики [2]. Для удаления отложений сажи в DPF с целью регенерации фильтра было предложено выжигание с помощью каталитических нейтрализаторов (система непрерывной регенерации CRT — Continuous Regeneration Trap [3]). Метод CRT хорошо зарекомендовал себя в автомобильных двигателях, но в судовых дизелях он не применим из-за высокого содержания в топливе серы, разрушающей каталитический нейтрализатор. Для судовых дизелей исследовался метод очистки фильтров DPF противотоком с использованием сжатого воздуха высокого давле-

ния [4]. Кроме того, разработана высокоэффективная технология регенерации DPF с использованием радикалов, образующихся под воздействием холодной плазмы [5, 6]. Данный метод является самодостаточным, не использует катализаторы и вполне подходит для судовых двигателей.

Более сложную проблему представляет снижение выбросов  $\text{NO}_x$ , особенно с учетом заметного ужесточения экологических стандартов за последнее время. В двигателях автомобилей и внедорожной техники для снижения уровня  $\text{NO}_x$  в условиях избытка кислорода ( $\text{O}_2$ ) в последние годы используется метод селективного каталитического восстановления  $\text{NO}_x$  (Selective Catalytic Reduction — SCR) с помощью мочевины или аммиака, ранее применявшийся в стационарных установках, таких как электростанции и агрегаты высокотемпературного сжигания [7–19]. Исследовалось также сочетание SCR с NTP-очисткой. Однако методу SCR свойственен ряд недостатков, а именно: для активации катализатора требуется температура порядка  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , при которой возможно образование наночастиц, существует опасность утечки аммиака, используются токсичные катализаторы на основе тяжелых металлов, необходимо иметь емкости для хранения мочевины.

В странах Запада переход к новым стандартам в части ограничения выбросов  $\text{NO}_x$  от автомобильных двигателей практически завершен, теперь очередь дошла до судовых двигателей. В выбросах судовых двигателей концентрация  $\text{NO}_x$  относительно высока ( $500\text{--}1000\text{ ppm}$ ),  $\text{SO}_x$  (порядка  $100\text{ ppm}$ ), присутствуют твердые частицы, поскольку эти двигатели работают на тяжелом топливе (marine diesel oil — MDO) или судовом дизельном топливе (marine fuel oil — MFO), где содержание серы составляет несколько процентов.

Требования к выбросам  $\text{NO}_x$  судовых дизелей устанавливаются Международной Морской Организацией (ИМО); нормы допустимых выбро-

сов  $\text{NO}_x$  показаны на рис. 1. Например, для судового двигателя с номинальной частотой вращения  $900\text{ об/мин}$ , использованного в настоящем эксперименте, предельно допустимые выбросы  $\text{NO}_x$  составляют  $9,2\text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  (Tier 2) с 2011 г., и  $2,3\text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$  (Tier 3) — с 2016 г. в зонах контролируемых выбросов  $\text{NO}_x$ . Таким образом, при переходе к Tier 3 от действующего в настоящее время стандарта Tier 2 выбросы  $\text{NO}_x$  должны быть снижены на  $6,9\text{ г/кВт}\cdot\text{ч}$ . Иначе говоря, снижение должно составить  $75\%$ , что выполнить будет далеко не просто. Производство двигателей, не соответствующих жестким требованиям Tier 3, после 2016 г. должно быть прекращено.

В этих обстоятельствах становится понятным, насколько актуальна проблема очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$  [20]. В 2011 г. большинству производителей судовых дизелей удалось достичь уровня требований Tier 2 по выбросам  $\text{NO}_x$  только за счет совершенствования процесса сгорания. Однако, учитывая уровень требований Tier 3 в части снижения выбросов  $\text{NO}_x$ , большинство специалистов считает, что его достижение невозможно без использования эффективной технологии газоочистки.

В ходе настоящего исследования, на основе наших предыдущих работ по снижению выбросов  $\text{NO}_x$  с помощью NTP в сочетании с адсорбцией [21, 22] была создана и испытана лабораторная установка для очистки ОГ двигателя, работающего на судовом дизельном топливе MDO (или тяжелом топливе типа «А»). Затем была разработана система газоочистки для судового дизеля с использованием комбинированного NTP-процесса.

### ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЧИСТКЕ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ ОТ $\text{NO}_x$ С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ

#### Принцип очистки отработавших газов от $\text{NO}_x$ с помощью холодной плазмы

Схема комбинированного метода удаления  $\text{NO}_x$  в лабораторной установке показана на рис. 2. Данная технология включает в себя три процесса: (а) адсорбцию, (б) десорбцию и (в) EGCR (рециркуляция компонентов отработавших газов). Порядок их чередования следующий: (а)–(б)–(в). Все три процесса протекают последовательно в одной и той же камере поглощения.

Как видно из рис. 2, а, на стадии адсорбции отработавшие газы сначала проходят через DPF, где они очищаются от твердых частиц.

Затем газы охлаждаются в воздушном радиаторе и направляются в камеру поглощения, где они частично очищаются от  $\text{NO}_x$  за счет адсорбции. Одновременно идет адсорбция  $\text{CO}_2$ , углеводородов (HCs) и водяных паров.

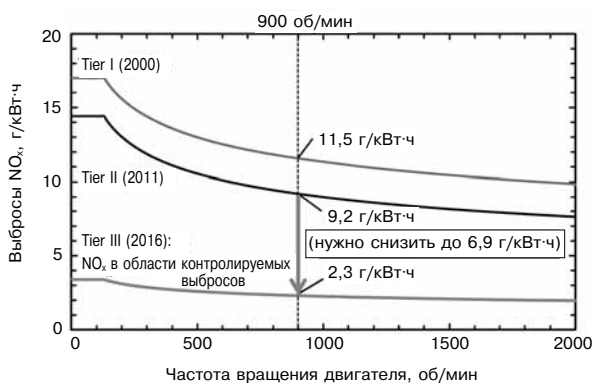
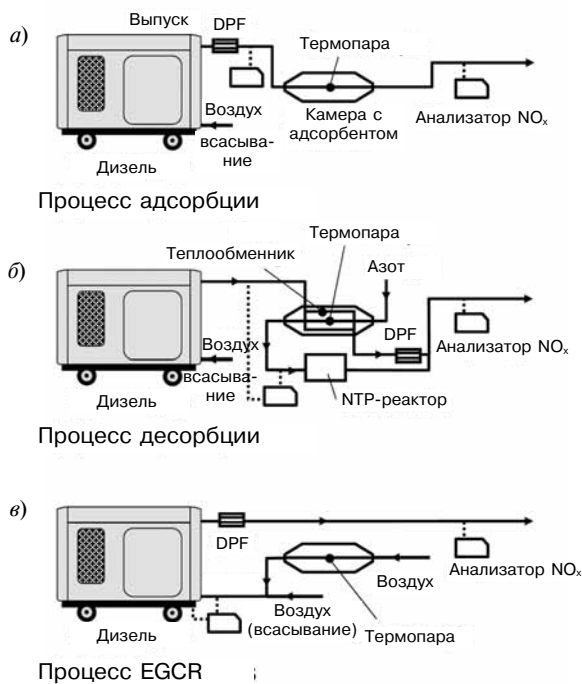


Рис. 1. Нормативы выбросов ИМО и требования к снижению  $\text{NO}_x$  для уровней Tier 1–3



**Рис. 2. Процессы очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$  в лабораторной установке**

На рис. 2, б показаны газовые потоки в процессе десорбции при нагреве. Отработавшие газы сначала проходят через встроенный в камеру поглощения теплообменник, где нагревают гранулы адсорбента, чтобы инициировать термодесорбцию  $\text{NO}_x$ . Одновременно в зону, содержащую гранулы адсорбента, подается газообразный азот с расходом 10 нл/мин. При этом из гранул элюируется (вымывается)  $\text{NO}_x$  высокой концентрации. Подача азота осуществляется воздушным насосом (на рисунке не показан). Затем в NTP-реакторе происходит восстановление элюированных газообразным азотом  $\text{NO}_x$ . Точка измерения концентрации  $\text{NO}_x$  находится ниже точки слияния потоков отработавших газов и восстановленного азота.

На рис. 2, в показаны газовые потоки в процессе EGCR. Атмосферный воздух с расходом порядка 50 нл/мин подается в зону адсорбента за счет существующего на всасывании двигателя разрежения. Воздух охлаждает гранулы адсорбента, нагретые поступающим в теплообменник потоком отработавших газов. Одновременно продолжается термодесорбция  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и водяных паров. Указанные компоненты подаются на всасывание двигателя. В докладе [21] этот процесс назван EGCR. Данный процесс имеет одно существенное отличие от EGR. Поскольку в EGR часть отработавших газов направляется в двигатель, состав газов в линии рециркуляции не отличается от состава «сырых» отработавших газов. Если же говорить о технологии EGCR, то здесь десорби-

рованный газ подается в линию рециркуляции после того, как часть отработавших газов из двигателя была частично поглощена адсорбентом. Поэтому газ в линии рециркуляции по своему составу отличается от «сырых» отработавших газов более высокой концентрацией  $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_2$  и водяных паров. Как было показано в работах [21, 22], EGCR обеспечивает лучшую очистку отработавших газов от  $\text{NO}_x$ , поскольку возвращаемые в двигатель  $\text{NO}_x$  и  $\text{CO}_2$  имеют более высокую концентрацию. Концентрация компонентов измеряется как на входе, так и на выходе двигателя. Кроме того, во всех процессах измеряется температура газа на входе в двигатель.

### Метод снижения $\text{NO}_x$ и его реализация в системе газоочистки (лабораторная установка)

Схема лабораторной установки показана на рис. 3. Направление потоков в процессах (а)–(в) показано стрелками.

Лабораторные исследования велись на стационарном дизель-генераторе (YDG200VS-6E, YANMAR Co., Ltd., Japan) на базе одноцилиндрового двигателя мощностью 2,0 кВт при 3600 об/мин, с рабочим объемом 219 мл. Расход отработавших газов равен 300 нл/мин (символ «н» здесь означает нормальные условия, т. е. 0 °C, 0,1 МПа) при работе двигателя на нагрузку (электронагреватель мощностью 1 кВт, подключенный к выходным клеммам генератора). Концентрация  $\text{NO}_x$  измерялась анализатором  $\text{NO}_x$  (PG-235, Horiba, Ltd.). В качестве топлива использовалось судовое дизельное топливо (marine diesel oil — MDO) с содержанием серы 0,067 %, или отфильтрованное тяжелое топливо типа «А». Отработавшие газы содержат 660~770 ppm



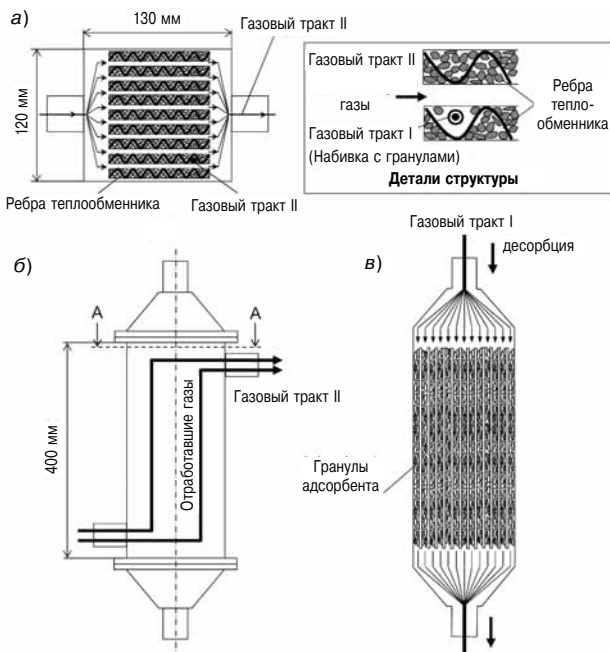
**Рис. 3. Схема лабораторной установки**

$\text{NO}_x = (\text{NO} + \text{NO}_2)$ , 433–1607 ppm CO, и 7 % (по объему) воды.

Для охлаждения отработавших газов перед входом в камеру поглощения (с целью повышения эффективности адсорбции) используется воздушный радиатор (потребляемая мощность 15,5 Вт).

Конструкция камеры поглощения схематически изображена на рис. 4. Здесь же показано взаимодействие газовых потоков в процессе десорбции. Через камеру поглощения проходят два многократно пересекающихся, но изолированных газовых тракта — I и II. Газовый тракт I заполнен гранулированным адсорбентом, газовый тракт II пуст. С целью интенсификации теплообмена газовый тракт I снабжен гофрированными ребрами. В процессе адсорбции поток отработавших газов направляется через газовый тракт II снизу вверх, при этом  $\text{NO}_x$  поглощаются гранулами адсорбента.

В процессе десорбции горячие отработавшие газы пропускаются через газовый тракт I для нагрева гранул адсорбента, одновременно через газовый тракт I в направлении сверху вниз пропускается газообразный азот. В процессе EGCR горячие отработавшие газы пропускаются через газовый тракт I для нагрева гранул адсорбента, одновременно через газовый тракт I в направлении сверху вниз пропускается поток воздуха. Для управления этими тремя процессами используется переключение газовых трактов путем открытия и закрытия соответствующих шаровых клапанов.

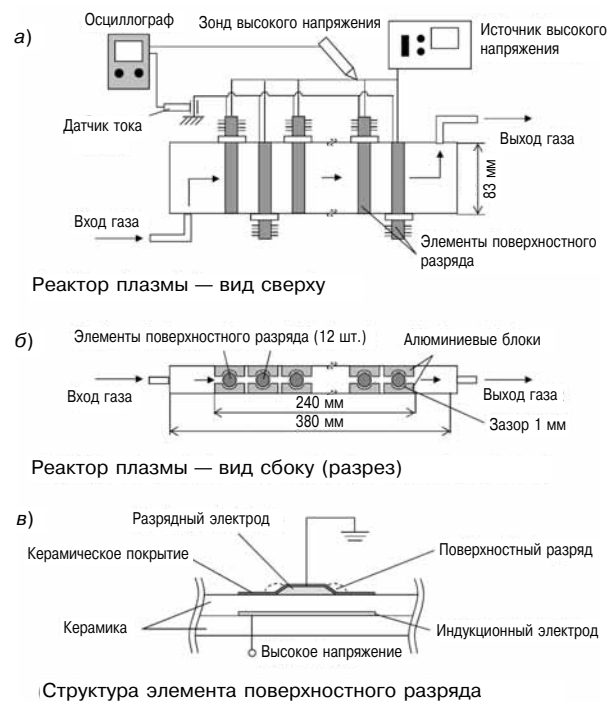


**Рис. 4. Схема камеры поглощения лабораторной установки с адсорбцией и десорбцией  $\text{NO}_x$ :**

(а) — сечение А-А (масштаб 2:1); (б) — вид сбоку; (в) — вид спереди (в разрезе)

Размеры секции с гранулами адсорбента составляют 120×130×400 мм. Адсорбент, использованный в настоящей работе, представляет собой окислительный компаунд N-140 производства «Sud-Chemie Catalysts Japan, Inc.» (круглые гранулы  $\text{MnO}_x\text{-CuO}$  диаметром 1,2–2,4 мм) с рутениевой пропиткой (1 %масс). Набивка весит 2,7 кг и занимает объем 3,15 л. Температура адсорбента измерялась с помощью термопар.

Устройство реактора холодной плазмы показано на рис. 5. Реактор представляет собой алюминиевый патрубок с двенадцатью последовательно расположенными элементами поверхностного разряда (рис. 5, а). Элемент поверхностного разряда ОС-002 производства «Masuda Research Inc.», Japan, представляет собой керамическую трубку диаметром 13 мм, на поверхности которой под действием высокого напряжения между внутренней и наружной поверхностями керамической стенки возникает NTP, как показано на рис. 5, в. Каждый элемент окружен алюминиевыми блоками, направляющими поток газов так, чтобы он омывал поверхность элементов, генерирующих NTP (см. рис. 5, б). Зазор между блоками равен 1 мм. При прохождении большей части потока газов через зону формирования NTP, существенно повысилась степень очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$ . Элементы параллельно подключены к источнику высокого напряжения типа HC-RK производства «Masuda Research Inc.» максимальной мощностью 300 Вт. Элемент



**Рис. 5. Схема расположения реакторов холодной плазмы (NTP-реакторов) для очистки отработавших газов от  $\text{NO}_x$  в лабораторном эксперименте**

генерирует импульсы переменной полярности частотой 10 кГц с максимальной амплитудой напряжения 5 кВ. Источник предназначен для питания элементов с точно согласованным импедансом. Напряжение измерялось с помощью зонда высокого напряжения P6015A производства «Tektronix Japan, Ltd.» и осциллографа DL1740 производства «Yokogawa Electric Corporation». Суммарный ток разряда двенадцати элементов измерялся с помощью датчика тока (датчик переменного тока P6021, «Tektronix Japan, Ltd.»), расположенного на стороне заземления. Мощность разряда определялась путем интегрирования по времени произведения  $V \times I$ , выражающего мощность, потребляемую элементами поверхностного разряда.

#### Оценка результатов лабораторного эксперимента

На рис. 6 показаны значения выбросов  $\text{NO}_x$  до и после прохождения газов через систему газоочистки для рабочих циклов 19–23, когда режим работы системы газоочистки можно считать установившимся. Масса  $\text{NO}_x$  оценивалась по молекулярному весу  $\text{NO}_2$ , при этом единицей измерения является  $\text{г}(\text{NO}_2)$  (грамм  $\text{NO}_2$ ). Белыми кружками обозначен массовый расход  $\text{NO}_x$  перед системой газоочистки. Черными кружками обозначен массовый расход  $\text{NO}_x$  после системы газоочистки.

Можно было ожидать, что в установившемся режиме количества поглощенных и выделенных  $\text{NO}_x$  в циклах адсорбции/десорбции будут равны. Однако, как оказалось, количество поглощенных  $\text{NO}_x$  превышало количество выделенных  $\text{NO}_x$  даже после достижения установившегося режима. Это может быть объяснено тем, что адсорбент  $\text{Ru/MnO}_x\text{—CuO}$  при его нагреве в условиях кислородного дефицита действует как катализатор восстановления  $\text{NO}_x$ , при этом в качестве восстановителей выступают адсорбированные углеводороды.

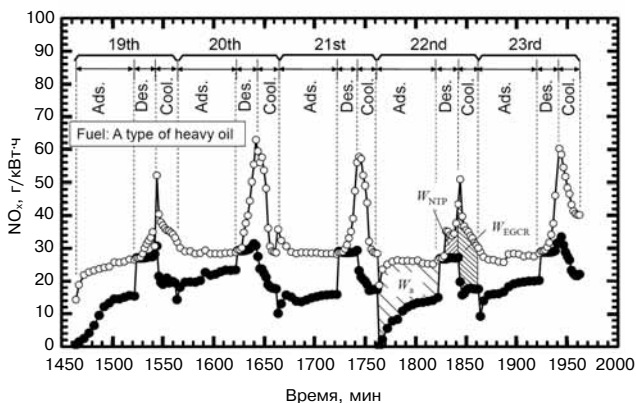


Рис. 6. Изменение во времени содержания  $\text{NO}_x$  в отработавших газах до и после системы газоочистки (циклы 19–23)

Массовый расход  $\text{NO}_x$  с неочищенными отработавшими газами изображен на графике линией с белыми символами. Плазма NTP использовалась только в процессах нагрева с мощностью разряда 120 Вт. Массовый расход  $\text{NO}_x$  в составе неочищенных отработавших газов составил 26,5 г/ч, причем внутри каждого цикла наблюдались флуктуации этого параметра. Примерно 46 %  $\text{NO}_x$ , выходящих из двигателя, стабильно поглощаются. Циклическая вариация свидетельствует о восстановлении способности системы к адсорбции  $\text{NO}_x$  в процессе нагрева и охлаждения.

В табл. 1 приведены количества  $\text{NO}_x$ , подвергшихся адсорбции, десорбции, восстановлению и очистке в каждом цикле. Система очистки находится в установившемся режиме, и это, в частности, касается количества выделенных  $\text{NO}_x$ . Однако в некоторых случаях флуктуации наблюдаются даже и в установившемся режиме, поскольку в ходе эксперимента возможны небольшие изменения его условий, например, температуры среды или состояния двигателя. В этих циклах масса адсорбированных  $\text{NO}_x$ ,  $W_a$  колеблется от 7,48 до 14,83 г. В процессах десорбции и EGCR общая масса выделенных  $\text{NO}_x$ ,  $W_d$  колеблется в пределах от 5,55 до 9,71 г.  $W_{\text{NTP}}$ , т. е. масса  $\text{NO}_x$ , восстановленных с помощью NTP, находится в пределах 0,95–3,34 г. Энергоэффективность NTP-реактора в данном процессе рассчитывается по формуле

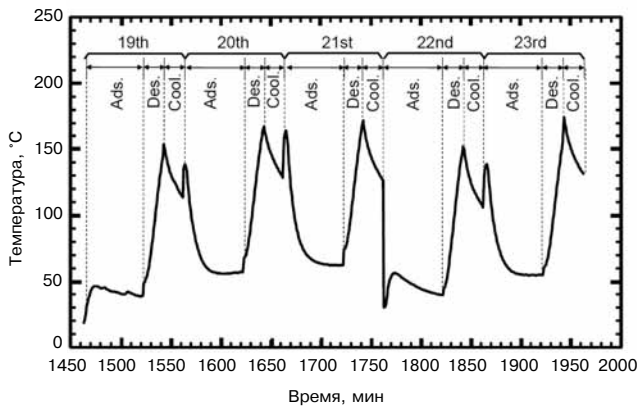
$$\eta_{\text{NTP}} = W_{\text{NTP}}/E_{\text{plasma}} \quad (1)$$

и составляет (23,8–83,5) г/кВт·ч (см. табл. 1). Результаты эксперимента показали, что энергоэффективность реакции повышается благодаря сорократному увеличению концентрации  $\text{NO}_x$

Таблица 1

#### Количество удаленных $\text{NO}_x$ и энергоэффективность очистки в каждом цикле лабораторного эксперимента (циклы 19–23)

Цикл	19	20	21	22	23
Количество $\text{NO}_x$ в «сырых» отработавших газах, г	23,27	28,40	28,78	24,93	26,89
Поглощенные $\text{NO}_x$ $W_a$ , г	13,54	7,48	14,19	14,83	9,49
Выделенные $\text{NO}_x$ $W_d$ , г	4,96	9,36	7,07	5,55	9,71
$\text{NO}_x$ , удаленные за счет NTP $W_{\text{NTP}}$ , г	0,95	3,34	1,88	1,92	2,42
$\text{NO}_x$ , удаленные за счет EGCR $W_{\text{EGCR}}$ , г	5,50	8,15	7,85	6,29	7,78
$\text{NO}_x$ , удаленные в системе $W_{\text{system}}$ , г	15,0	9,6	16,8	17,5	10,0
Энергия NTP $E_{\text{plasma}}$ , Вт·ч	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Энергоэффективность очистки за счет NTP, г/кВт·ч	23,7	83,4	47,0	47,9	60,4
Энергоэффективность очистки $\eta_{\text{system}}$ , г/кВт·ч	376	240	421	437	250



**Рис. 7. Изменение во времени температуры адсорбента в лабораторном эксперименте (циклы 19–23)**

(до 2,8 % об.) в результате десорбции. В процессах EGCR масса  $\text{NO}_x$ , восстановленных за счет эффекта EGCR,  $W_{\text{EGCR}}$  составляет 5,50–8,15 г.

Зная массовый выброс  $\text{NO}_x$  из системы в процессах десорбции и EGCR, можно рассчитать энергоэффективность системы очистки как количество удаленных  $\text{NO}_x$ , отнесенное к потребляемой энергии разряда, по формулам

$$W_{\text{system}} = W_a - W_d + W_{\text{NTP}} + W_{\text{EGCR}}; \quad (2)$$

$$\eta_{\text{system}} = W_{\text{system}} / E_{\text{plasma}}, \quad (3)$$

где  $E_{\text{plasma}}$  — расход энергии плазмы в процессе нагрева. На 22-м цикле значения параметров составляют:  $W_a = 14,83$  г,  $W_d = 5,55$  г,  $W_{\text{NTP}} = 1,92$  г,  $W_{\text{EGCR}} = 6,29$  г и  $E_{\text{plasma}} = 40,0$  Вт·ч. Таким образом, на этом цикле зарегистрировано максимальное значение энергоэффективности системы, равное  $\eta_{\text{system}} = 437$  г/кВт·ч.

На рис. 7 показано температурное распределение в камере поглощения в циклах 19–23. Максимальная температура цикла составляет около 180 °С (в процессе десорбции), а минимальная 50 °С (в процессе адсорбции), что можно считать идеальными значениями температур для данной системы.

С учетом достигнутой энергоэффективности расход мощности в системе при выполнении требований IMO Tier 3 составит порядка 1,6 % ( $100 \times 6,9 / 437$ ) мощности двигателя. Система очистки с такими показателям должна обеспечить выполнение требований IMO Tier 3, без изменения рабочего процесса.

**ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ОЧИСТКЕ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЯ ОТ  $\text{NO}_x$  С ПОМОЩЬЮ ХОЛОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА ОПЫТНОМ ДИЗЕЛЕ**

**Реализация метода снижения  $\text{NO}_x$  на опытно-промышленной установке**

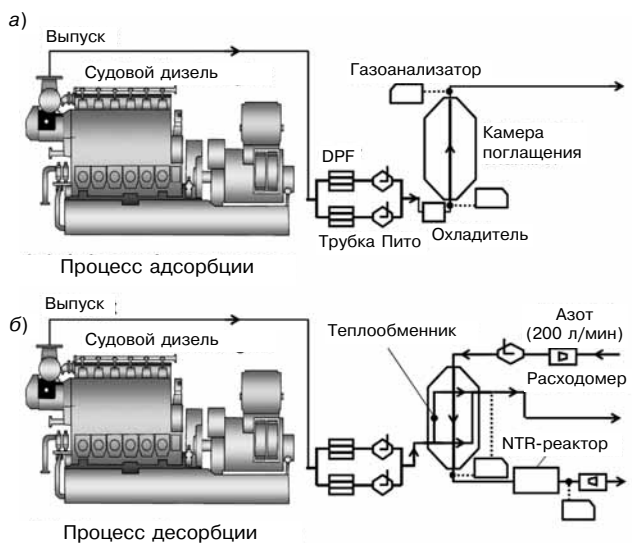
С использованием описанных выше результатов лабораторных экспериментов была создана опытно-промышленная система газоочистки.

В качестве объекта эксперимента был выбран судовой дизель. Схема опытной системы снижения выбросов  $\text{NO}_x$  показана на рис. 8. Система состоит из следующих основных компонентов: дизель, фильтры DPF, камера поглощения и NTP-реакторы. Удаление  $\text{NO}_x$  из отработавших газов происходит с помощью двух процессов:

- адсорбции;
- десорбции с использованием NTP-плазмы.

Непрерывное удаление части  $\text{NO}_x$  из отработавших газов происходит в ходе двух последовательных процессов, протекающих в одной и той же камере поглощения. Как видно из рис. 8, а, отработавшие газы в процессе адсорбции сначала очищаются от твердых частиц в DPF. Для определения расхода отработавших газов измерялась скорость газового потока с помощью трубок Пито (тип L, FV-21 A, «OKANO WORKS, Ltd.» Japan).

Затем газы охлаждаются в теплообменнике с водяным охлаждением и направляются в камеру поглощения, где происходит адсорбция  $\text{NO}_x$ . Одновременно с этим протекают процессы адсорбции  $\text{CO}_2$ , углеводородов (HCs) и водяных паров. Значения концентрации  $\text{NO}_x$  измерялись на входе и на выходе камеры поглощения с помощью анализатора  $\text{NO}_x$  типа PG-235 производства «Horiba, Ltd.». В процессе десорбции, как видно из рис. 2, б, отработавшие газы проходят через теплообменник, встроенный в камеру поглощения. Тепло отработавших газов в процессе теплообмена нагревает гранулы адсорбента, что инициирует термодесорбцию  $\text{NO}_x$ . Одновременно через набивку из гранул адсорбента пропускается газ с малым количеством кислорода или азот в



**Рис. 8. Принципиальная схема опытно-промышленной установки для очистки отработавших газов судового двигателя от  $\text{NO}_x$**

количестве 11,1–22,2 нм<sup>3</sup>/ч. В результате из камеры элюируются (вымываются) NO<sub>x</sub> высокой концентрации (типичная величина концентрации — 3000 ppm), которые проходят очистку и восстановление в NTP-реакторе. Измерение концентрации NO<sub>x</sub> в отработавших газах производится как перед их очисткой в NTP-реакторе, так и после нее.

В качестве опытного двигателя в составе опытно-промышленной установки был выбран дизель типа 6DK-20 производства «Daihatsu Diesel MFG Co., Ltd.», Japan. Номинальная мощность опытного четырехтактного шестицилиндрового двигателя размерностью 20/30, работающего при постоянной частоте вращения 900 об/мин, равна 1071 кВт. Общий вес дизель-генератора составляет 16 т. Двигатель работал на судовом дизельном топливе типа «А» с массовым содержанием серы 0,075 %, азота 0,01 % и теплотворной способностью 45,4 МДж/кг. Расход отработавших газов равен 3920 нм<sup>3</sup>/ч при 50 %-ной нагрузке, 5526 нм<sup>3</sup>/ч при 75 %-ной нагрузке, и 6815 нм<sup>3</sup>/ч при 100 %-ной нагрузке (символ «н» означает стандартные условия, т. е. 0 °С и 0,1 МПа).

Схема экспериментальной установки для исследования системы очистки отработавших газов судового дизеля показана на рис. 9. В этой установке поток отработавших газов после двигателя разделяется. Примерно 13 % отводимого в байпас потока, величина которого изменяется с помощью регулирующей заслонки, пропускается через группу керамических фильтров DPF, удаляющих большую часть твердых компонентов РМ. Размер трубы байпаса (в системе обозначений Промышленных Стандартов Японии) равен 150А (что соответствует внутреннему диаметру 155,2 мм. Основные характеристики фильтра DPF производства «TYK Corporation», Japan, следующие: материал — SiC, диаметр — 190,5 мм, длина — 100 мм, плотность структуры — 169 ячеек на кв. дюйм, толщина стенок — 16 миллов (16·10<sup>-3</sup> дюйма). В DPF задерживается более 95 % находящихся в отработавших газах частиц. Частицы, аккумулированные в DPF, обрабатываются озоном (O<sub>3</sub>), образовавшимся под действием плазмы [6], в озонаторе EW-90Z, «Ebara Jitsugyo Co., Ltd.» в количестве O<sub>3</sub> = 90 г/ч при мощности 3,1 кВт. После удаления содержащихся в отработавших газах частиц NO<sub>x</sub> подвергаются обработке плазмой. Процесс очистки отработавших газов от NO<sub>x</sub> реализуется с помощью системы клапанов переключения и регулирования потоков в процессах адсорбции и десорбции. В процессе адсорбции отработавшие газы, имеющие тем-

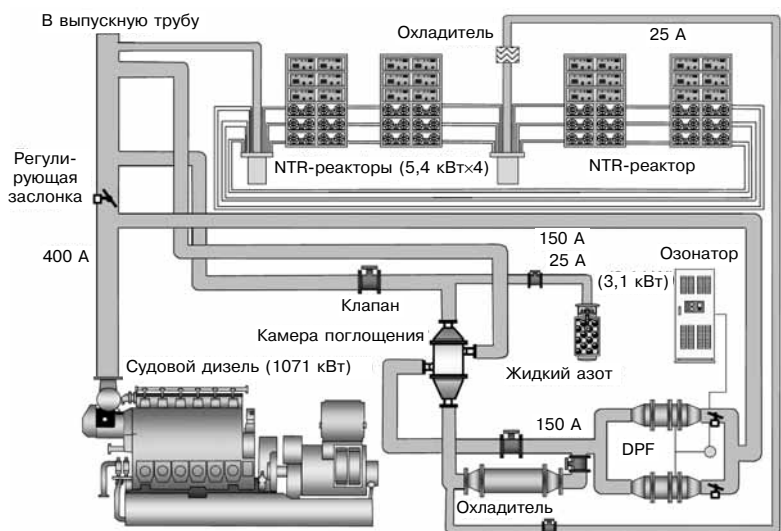


Рис. 9. Схема опытно-промышленной установки для исследования системы очистки отработавших газов судового дизеля

пературу порядка 270 °С, направляются в водяной холодильник, где охлаждаются примерно до 45 °С. В камере поглощения, где находится адсорбент, происходит адсорбция до 92 % NO<sub>x</sub>. И наконец, отработавшие газы уходят в выпускную трубу. Для обеспечения десорбции небольшое количество (11,1– 22,2 нм<sup>3</sup>/ч) азота N<sub>2</sub> с помощью управляемых клапанов подается из цилиндра с жидким азотом и пропускается в газообразном виде через камеру поглощения. Поток газообразного азота N<sub>2</sub> при адсорбции движется в направлении, противоположном потоку отработавших газов. Одновременно при этом происходит нагрев камеры теплом отработавших газов. В результате из камеры выходит газовый поток с высокой (порядка 3000 ppm) концентрацией NO<sub>x</sub>, который поступает в NTP-реакторы общей мощностью до 21,6 кВт.

На рис. 10 показана камера поглощения, оборудованная утилизационным теплообменником конструкции и производства «Sumitomo Precision Products Co., Ltd.». Также показаны направления движения потоков и размеры аппарата. На схеме видны два различных газовых тракта — тракт I и тракт II. Потоки газа в обоих трактах изолированы друг от друга, но между ними происходит интенсивный теплообмен. Газовый тракт I, высота которого равна 270 мм, заполнен гранулированным адсорбентом, тогда как газовый тракт II свободен. Кроме того, газовый тракт I снабжен гофрированными ребрами для интенсификации теплообмена. В процессе адсорбции поток отработавших газов направляется через газовый тракт I снизу вверх, при этом NO<sub>x</sub> поглощается гранулами адсорбента. В процессе десорбции горячие отработавшие газы, двигаясь по тракту II, нагревают гранулы адсорбента,

одновременно небольшое количество газообразного азота или газа с низким содержанием кислорода пропускается через газовый тракт I сверху вниз, как показано на рис. 10, а и б.

Для переключения между этими двумя процессами направление газовых потоков меняется путем открытия и закрытия соответствующих шаровых клапанов. В данном эксперименте использовался адсорбент типа N-140, представляющий собой окислительный компаунд  $MnO_x-CuO$  производства «Sud-Chemie Catalysts Japan, Inc.» в виде круглых гранул размером порядка 2,4 мм.

Температура адсорбента измерялась термопарами, расположение которых показано на рис. 10, б. Перепад давления в камере поглощения составляет 2 кПа при расходе отработавших газов  $830 \text{ нм}^3/\text{ч}$  (что соответствует нагрузке двигателя 75 %). Теплообменник противоточного типа обеспечивает эффективность теплообмена 928 Вт/К при следующих условиях: расход газа (сухого) на входе в газовый тракт I =  $800 \text{ нм}^3/\text{ч}$  при  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ; на входе в тракт II =  $800 \text{ нм}^3/\text{ч}$  при  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

На рис. 11 показана схема NTP-реактора, используемого для удаления  $NO_x$  в процессе десорбции. Реактор состоит из элементов поверхностного разряда типа ET-OC70G-C производства «Masuda Research Inc.», Japan, вентилятора охлаждения, оребрения и фланца крепления элемента к раме. Вольфрамовые разрядные электроды расположены на внутренней стенке эле-

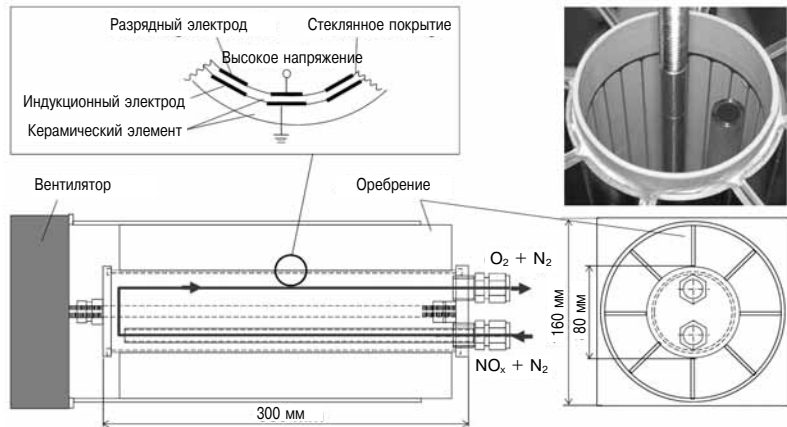


Рис. 11. Схема NTP-реактора, структура разрядной секции и вид внутренней части реактора опытно-промышленной установки (фото)

мента из корундовой керамики. Установка включает две группы таких реакторов с импульсными источниками высокого напряжения типа НСП-70/2 («Masuda Research Inc.»). Его технические характеристики: максимальная амплитуда напряжения 10 кВ, частота 10 кГц, максимальная потребляемая мощность 900 Вт. Генератор NTP типа НСП-ОС70×12 состоит из двенадцати NTP-реакторов и шести источников питания. Суммарное потребление мощности генератора NTP равно  $900 \text{ Вт} \times 6 = 5,4 \text{ кВт}$ , а мощность разряда или эффективная мощность NTP равна 5,0 кВт. Четыре генератора NTP, использованные в эксперименте, показаны на рис. 9. Четыре блока NTP-реакторов объединены в три отдельные параллельные линии с общим расходом газов  $60 \text{ нм}^3/\text{ч}$ . Выделившиеся из сорбента  $NO_x$  высокой концентрации поступают на вход реактора с потоком  $N_2$ , а  $NO_x$ , восстановленные с помощью NTP, выходят из реактора в виде чистых газов  $N_2$  и  $O_2$ .

**Результаты эксперимента на опытно-промышленной установке**

Эксперимент, состоящий из 12 циклов, проводился для оценки эффективности очистки отработавших газов от  $NO_x$ . В каждом процессе двигатель один раз останавливался.

На рис. 12 показано содержание  $NO_x$  в отработавших газах в функции времени до и после прохождения газа через систему газоочистки (испытательные циклы 2–4, 9 и 10). Нагрузка двигателя составляла 75 % для всех процессов адсорбции, и 50 % — для всех процессов десорбции. На данном графике по оси ординат отложен массовый расход  $NO_x$  в г/ч. Содержание  $NO_x$  в отработавших газах до их очистки обозначено белыми кружками, а после очистки — черными кружками. Плазма NTP была задействована только в процессе десорбции, при этом потребление мощности NTP-генератором равнялось

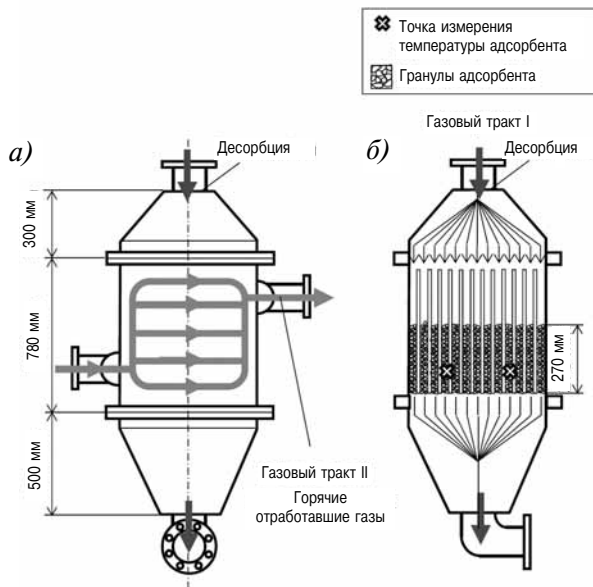


Рис. 10. Схема камеры поглощения с теплообменником: а — вид сбоку; б — вид спереди (в разрезе)



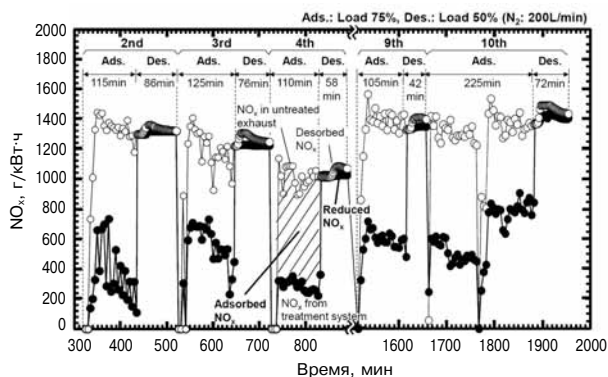


Рис. 12. Сравнительная оценка содержания  $\text{NO}_x$  в функции времени до и после системы газоочистки (циклы 2–4, 9 и 10)

21,6 кВт в циклах 2–4, и 12,0 кВт — в циклах 9 и 10. Массовый расход  $\text{NO}_x$  до очистки был равен 1566–4592 г/ч и в процессе адсорбции в поглощающей системе был снижен до 430–1570 г/ч. Усредненная степень восстановления  $\text{NO}_x$  в циклах 2–4, 9 и 10 составила 68 и 57 % соответственно. В цикле 4 (заштрихованная область процесса адсорбции, ограниченная белыми и черными кружками), представляет собой суммарную массу адсорбированных  $\text{NO}_x$ , тогда как область процесса десорбции выражает суммарную массу  $\text{NO}_x$ , восстановленных с помощью NTP.

В табл. 2 приведены результаты эксперимента на опытном двигателе. В процессах адсорбции масса поглощенных  $\text{NO}_x$ ,  $W_a$ , изменялась в пределах от 1118 до 2365 г. В соответствующих

Таблица 2

**Количество  $\text{NO}_x$  после очистки и энергоэффективность очистки в каждом цикле эксперимента на опытном-промышленной установке (циклы 2–4, 9 и 10)**

Цикл	2	3	4	9	10
Средний расход отработавших газов, $\text{м}^3/\text{ч}$	791,0	720,3	661,1	769,0	738,7
Количество $\text{NO}_x$ в «сырых» отработавших газах, г	2215	2127	1566	2208	4592
Поглощенные $\text{NO}_x$ $W_a$ , г	1586	1120	1118	1254	2365
$\text{N}_2$ , $\text{м}^3/\text{ч}$	11,1	11,1	11,1	11,1	11,1
Выделенные $\text{NO}_x$ $W_d$ , г	49,1	66,8	32,7	41,2	109
$\text{NO}_x$ , удаленные за счет NTP $W_{\text{NTP}}$ , г	25,7	55,0	20,7	29,9	56,6
$\text{NO}_x$ , удаленные в системе $W_{\text{system}}$ , г	1563	1108	1106	1243	2312
Мощность NTP, кВт	21,6	21,6	21,6	12,0	12,0
Энергия NTP $E_{\text{plasma}}$ , кВт·ч	31,0	27,4	20,9	8,40	14,4
Энергоэффективность очистки за счет NTP $\eta_{\text{NTP}}$ , г/кВт·ч,	0,83	2,01	0,99	3,55	3,93
Энергоэффективность очистки $\eta_{\text{system}}$ , г/кВт·ч	50,5	40,5	53,0	148	161

процессах десорбции масса выделенных  $\text{NO}_x$ ,  $W_d$ , изменялась в пределах от 32,7 до 109 г. Масса  $\text{NO}_x$ , восстановленных с помощью NTP,  $W_{\text{NTP}}$ , находилась в пределах 25,7–56,6 г. Общая масса  $\text{NO}_x$ , удаленных в системе, сочетающей действие адсорбции и NTP,  $W_{\text{system}}$ , а также энергоэффективность удаления  $\text{NO}_x$   $\eta_{\text{system}}$ , рассчитывались соответственно как

$$W_{\text{system}} = W_a - W_d + W_{\text{NTP}}; \quad (4)$$

$$\eta_{\text{system}} = W_{\text{system}} / E_{\text{plasma}}. \quad (5)$$

В опытно-промышленной установке система EGCR не использовалась, поскольку это привело бы к чрезмерному ее усложнению. Энергоэффективность обработки газов плазмой  $\eta_{\text{NTP}}$  рассчитывалась по уравнению (1).

В результате были получены следующие значения энергоэффективности очистки:  $\eta_{\text{NTP}} = 0,83\text{--}3,93$  г/кВт·ч. Наивысший коэффициент энергоэффективности системы был достигнут в 10-м цикле и составил  $\eta_{\text{system}} = 161$  г/кВт·ч при наименьшем расходе мощности на NTP — 12 кВт, что оказалось достаточным для восстановления  $\text{NO}_x$ .

На рис. 13 показана температура отработавших газов в тракте I камеры поглощения, измеренная в циклах 2–4, 9 и 10. Значения температуры на графике показаны как результат усреднения измеренной температуры в двух точках. Хотя в начале каждого процесса адсорбции температура адсорбента превышает 200 °C (из-за остаточного тепла, выделившегося в предшествующем процессе десорбции), она быстро снижается до 60 °C в результате притока охлажденных отработавших газов в камеру поглощения. В процессе десорбции температура быстро повышается благодаря теплообмену с отработавшими газами, находящимися в тракте II. При снижении температуры адсорбента эффективность адсорбции  $\text{NO}_x$  повышается. Эффективность десорбции  $\text{NO}_x$ , напротив, повышается с ростом температуры адсорбента.

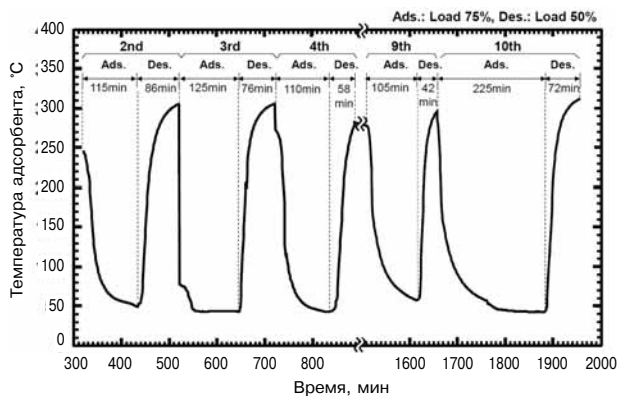


Рис. 13. Изменение во времени температуры адсорбента в эксперименте на опытном-промышленной установке (циклы 2–4, 9, и 10)

Система газоочистки может обеспечить оптимальные температуры для обоих процессов — адсорбции и десорбции.

На рис. 1 показано, что для выполнения нормы IMO Tier 3 применительно к судовому дизелю с частотой вращения 900 об/мин необходимо снизить выбросы NO<sub>x</sub> на 6,9 г/кВт·ч. С учетом достигнутой энергоэффективности потребление мощности системой газоочистки при этом составит порядка 4,3 % (100 × 6,9/161) мощности двигателя.

В описываемом эксперименте показатель десорбции NO<sub>x</sub> оказался ниже показателя адсорбции, поскольку число последовательных циклов оказалось недостаточным для достижения равновесного состояния.

Расчеты показывают, что если число циклов увеличится настолько, чтобы соотношение  $W_d/W_a$  приблизилось к 100 %, то станет возможным достижение энергоэффективности системы на установившемся режиме свыше 100 г/кВт·ч.

### ВЫВОДЫ

Комбинированная система газоочистки с помощью адсорбции, плазмы и EGCR в экспериментах на лабораторной установке продемонстрировала исключительно высокую энергоэффективность очистки отработавших газов от NO<sub>x</sub>, достигавшую 437 г/кВт·ч. На основе разработанной технологии и методики создана система очистки отработавших газов судового дизеля.

Разработана и испытана опытно-промышленная установка газоочистки на базе судового дизеля мощностью 1 МВт, на котором определены характеристики адсорбции/десорбции NO<sub>x</sub> и очистки отработавших газов от NO<sub>x</sub>. Проведен анализ полученных результатов.

Дана оценка энергоэффективности очистки отработавших газов от NO<sub>x</sub> с помощью NTP. Система продемонстрировала высокую энергоэффективность удаления NO<sub>x</sub> из отработавших газов, равную 161 г/кВт·ч, без использования EGCR. Высокая энергоэффективность данной технологии объясняется использованием процессов адсорбции и десорбции для извлечения NO<sub>x</sub> высокой концентрации из состава отработавших газов. Это позволяет выполнить вступающие в силу в 2016 г. требования IMO Tier 3 по выбросам NO<sub>x</sub> для судового дизеля при энергозатратах не более 4,3 % от мощности двигателя. Система не нуждается в катализаторах на основе редкоземельных или благородных металлов, а также в таких веществах, как токсичный аммиак или раствор мочевины. В этом заключается решающее преимущество рассматриваемого метода по сравне-

нию с традиционными технологиями газоочистки, как, например, метод SCR.

### Литература

1. Okubo M., Arita N., Kuroki T., and Yamamoto T. Total Diesel Emission Control System Using Ozone Injection and Plasma Desorption // Plasma Chemistry and Plasma Processing. — 2008. — Vol. 28. — P. 173–187.
2. Kuroki T., Ishidate M., Okubo M., and Yamamoto T. Charge-to-Mass Ratio and Dendrite Structure of Diesel Particulate Matter Charged by Corona Discharge // Carbon. — 2010. — Vol. 48. — P. 184–190.
3. Cooper B.J., and Thoss J.E. Role of NO in Diesel Particulate Emission Control. SAE Paper, 1989, № 89040.
4. Kato T., Ibaragi S., Matsuoka K., Imai K., and Sato K. Development of Diesel Particulate Filter Applying Nonthermal Plasma Technology for Onboard Diesel Generators // Journal of Japan Institute of Marine Engineering. — 2010. — Vol. 45. — P. 962–967.
5. Kuwahara T., Yoshida K., Hanamoto K., Sato K., Kuroki T., Yamamoto T., and Okubo M. Continuous Regeneration Characteristics of Ceramics Particulate Filter in Marine Diesel Engine Using Nonthermal Plasma-Induced Ozone Injection // J. Japan Institute of Marine Engineering. — 2012. — Vol. 47. — P. 379–384.
6. Kuwahara T., Yoshida K., Hanamoto K., Sato K., Kuroki T., Yamamoto T., and Okubo M. Pilot-Scale Experiments of Continuous Regeneration of Ceramic Diesel Particulate Filter in Marine Diesel Engine Using Nonthermal Plasma-Induced Radicals // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2012. — Vol. 48. — P. 1649–1656.
7. Kang M., Park E.D., Kim J.M., and Yie J.E. Cu-Mn Mixed Oxides for Low Temperature NO Reduction with NH<sub>3</sub> // Catalysis Today. — 2006. — Vol. 111. — P. 236–241.
8. Marban G., Antuna R., and Fierres A.B. Low-Temperature SCR of NO<sub>x</sub> with NH<sub>3</sub> Over Activated Carbon Fiber Composite-Supported Metal Oxides // Applied Catalysis B. — 2003. — Vol. 41. — P. 323–338.
9. Miessner H., Francke K.P., Rudolph R., and Hammer T. NO<sub>x</sub> Removal in Excess Oxygen by Plasma-Enhanced Selective Catalytic Reduction // Catalysis Today. — 2002. — Vol. 75. — P. 325–330.
10. Koebel M., Elsener M., Kleemann M. Urea-SCR: A Promising Technique to Reduce NO<sub>x</sub> Emissions from Automotive Diesel Engines // Catalysis Today. — 2000. — Vol. 59. — P. 335–345.
11. Cha M.S., Song Y.H., Lee J.O., and Kim S.J. NO<sub>x</sub> and Soot Reduction Using Dielectric Barrier Discharge and NH<sub>3</sub> Selective Catalytic Reduction in Diesel Exhaust // International Journal of Environmental Science and Technology. — 2007. — Vol. 1. — P. 28–33.
12. Imai H., Ogawa T., Sugimoto K., Kataoka M., Tanaka Y., and Ono T. Comparison of Activities in Selective Catalytic Reduction of NO<sub>x</sub> by C<sub>3</sub>H<sub>8</sub> Over Co/MFI, Fe/MFI, and H/MFI Zeolite Catalysts // Applied Catalysis B. — 2005. — Vol. 55. — P. 259–265.
13. Rappe K.G., Hoard J.W., Aardahl C.L., Park P.W., and Peden C. H. F. Combination of Low and High Temperature Catalytic Materials to Obtain Broad Temperature

Coverage for Plasma-Facilitated NO<sub>x</sub> Reduction // Catalysis Today. — 2004. — Vol. 89. — P. 143–150.

14. *Hammer T., Kappes T., and Baldauf M.* Plasma Catalytic Hybrid Processes: Gas Discharge Initiation and Plasma Activation of Catalytic Processes // Catalysis Today. — 2004. — Vol. 89. — P. 5–14.

15. *Chae J. O.* Non-Thermal Plasma for Diesel Exhaust Treatment // Journal of Electrostatics. — 2003. — Vol. 57. — P. 251–262.

16. *Tonkyn R. G., Barlow S. E., and Hoard J. W.* Reduction of NO<sub>x</sub> in Synthetic Diesel Exhaust via Two-Step Plasma-Catalysis Treatment // Applied Catalysis B. — 2003. — Vol. 40. — P. 207–217.

17. *McMillan S. A., Broadbelt L. J., and Snurr R. Q.* Effect of Local Framework Heterogeneity on NO Adsorption in Cobalt-Ferrierite // Journal of Catalysis. — 2003. — Vol. 219. — P. 117–125.

18. *Adelman B. J., Beutel T., Lei G. D., and Sachtler W. M. H.* Mechanistic Cause of Hydrocarbon Specificity Over Cu/ZSM-5 and Co/ZSM-5 Catalysts in the Selective Catalytic Reduction of NO<sub>x</sub> // Journal of Catal-

ysis. — 1995. — Vol. 158. — P. 327–335.

19. *McAdams R., Beech P., and Shawcross J. T.* Low Temperature Plasma Assisted Catalytic Reduction of NO<sub>x</sub> in Simulated Marine Diesel Exhaust // Plasma Chemistry and Plasma Processing. — 2008. — Vol. 28. — P. 159–171.

20. *Hotub M., Kalisiak S., Borkowski T., Myskow J., and Brandenburg R.* The Influence of Direct Non-Thermal Plasma Treatment on Particulate Matter (PM) and NO<sub>x</sub> in the Exhaust of Marine Diesel Engines // Polish Journal of Environmental Studies. — 2010. — Vol. 19. — P. 1199–1211.

21. *Yoshida K., Kuroki T., and Okubo M.* Diesel Emission Control System Using Combined Process of Nonthermal Plasma and Exhaust Gas Components' Recirculation // Thin Solid Films. — 2009. — Vol. 518. — P. 987–992.

22. *Kuwahara T., Yoshida K., Kannaka Y., Kuroki T., and Okubo M.* Improvement of NO<sub>x</sub> Reduction Efficiency in Diesel Emission Control Using Nonthermal Plasma Combined Exhaust Gas Recirculation Process // IEEE Transactions on Industry Applications. — 2011. — Vol. 47. — P. 2359–2366.



ИМО  
НОВОСТИ ИМО

## КОМИТЕТ ПО ЗАЩИТЕ МОРСКОЙ СРЕДЫ ИМО УСТАНОВИЛ СРОКИ ВВЕДЕНИЯ СТАНДАРТА ИМО TIER-3 ДЛЯ СУДОВЫХ ДИЗЕЛЕЙ

Комитет по защите морской среды (КЗМС) Международной морской организации (ИМО) на очередной сессии КЗМС-66, работа которой завершилась в штаб-квартире ИМО в Лондоне 4 апреля 2014 г., принял окончательное решение о сроках введения стандарта ИМО Tier 3, регулирующего выбросы NO<sub>x</sub> от судовых дизелей в специальных областях контроля выбросов (ЕСА — Emission Control Areas).

На предыдущей сессии КЗМС-65, состоявшейся год назад, большинством участников-членов ИМО было принято решение, инициированное Российской Федерацией, о переносе планируемого срока назначения новых ЕСА (Северное и Балтийское моря) и введения в новых и существующих ЕСА стандарта ИМО Tier 3 с 01.01.2016 на 01.01.2021. К существующим ЕСА относятся Северо-Американское Атлантическое и Тихоокеанское побережье Канады и США, а также Карибское море.

В соответствии с регламентом ИМО принятое на сессии КЗМС-65 решение было сформулировано в виде проекта изменения Приложения VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78, который (проект) окончательно должен быть принят на сессии КЗМС-66.

Противниками, выразившими категорическое несогласие с изменением срока введения стандарта, последовательно выступали США, Канада, Дания, Германия, Япония и еще несколько стран. В результате этого противостояния в течение года, предшествующего сессии КЗМС-66, была развернута беспрецедентная борьба за отмену, как ошибочного и необоснованного, решения о переносе сроков введения стандарта ИМО Tier 3. В поддержку мнения США и их союзников в адрес руководства ИМО были направлены официальные ноты и протесты от Европейской ассоциации производителей двигателей (EUROMOT), дирекции международного конгресса СИМАС, международной ассоциации производителей каталитического оборудования для двигателей морского применения (ICCSEA). В своей официальной ноте (документ МЕРС 66/6/8) Администрация США даже поставила под сомнение способность руководства КЗМС ИМО к адекватной оценке экологических последствий

международного судоходства в случае изменения сроков введения стандарта ИМО Tier 3.

В ответной ноте Российской Федерации, в дополнение к ранее высказанным аргументам, о преждевременности назначения ЕСА в Балтийском море и обоснованности переноса срока введения стандарта ИМО Tier 3 на более позднее время, было отмечено, что руководство КЗМС ИМО в своих решениях руководствуется интересами всех своих членов, а не только поддержкой групповых бизнес интересов сторонников США и некоторых государств ЕС. В этой связи решение, принятое КЗМС-65, было продиктовано необходимостью развития конкурентной среды на рынке экологически безопасных судовых двигателей за счет появления многовариантных технологических решений для достижения требований стандарта ИМО Tier 3 в дополнение к продвигаемой США и ЕС технологии SCR-NH<sub>3</sub> как безальтернативной. Это решение в условиях не преодоленного экономического кризиса в судостроении и избыточного тоннажа коммерческого флота направлено на сохранение конкурентоспособности коммерческого судоходства, как важнейшей отрасли экономики Прибалтийских государств.

В результате дискуссии, состоявшейся на сессии КЗМС-66, было принято компромиссное решение, в соответствии с которым в действующих зонах контроля выбросов окислов азота (Североамериканское побережье и Карибское море), стандарт ИМО Tier-3 вводится с 01.01.2016 года и применяется к новым судам, киль которых заложен 01.01.2016 или после этой даты.

Новые зоны контроля выбросов окислов азота будут назначаться после принятия соответствующих поправок в Приложение VI к Конвенции МАРПОЛ 73/78, устанавливающих такую новую зону решением КЗМС ИМО. Дата введения стандарта ИМО Tier-3 в новых зонах ЕСА (например в Балтийском или Северном морях) принимается решением КЗМС ИМО исходя из готовности заинтересованных сторон, а именно технологической готовности производителей оборудования и инфраструктурной готовности прибрежных государств, портов и судовладельцев.

УДК 621.431

**Лимонов А.К.** ОАО «РУМО» — путь в 140 лет // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 3–11.

**Ключевые слова:** машиностроительный завод «Фельзер и К<sup>о</sup>», «Двигатель революции», ОАО «РУМО», 140 лет со дня основания.

Основанный в 1874 г. в Риге машиностроительный завод «Фельзер и К<sup>о</sup>», после эвакуации в Нижний Новгород был переименован в «Двигатель революции» и сегодня известен как ОАО «РУМО». Отмечая 140-летний юбилей, завод сохранил производство двигателей собственной конструкции, освоил выпуск лицензионных двигателей MAN и успешно включился в международную кооперацию. Табл. 1. Ил. 15.

УДК 621.431

**Рыжов В.А., Печенин В.В.** Совершенствование дизелей 16Д49 дизель-дизельных агрегатов 1ДДА12000 кораблей корвет проекта 20380 // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 12–19.

**Ключевые слова:** среднеоборотный судовый дизель, дизель-дизельный агрегат, переходные режимы, дымность отработавших газов, совершенствование систем управления, двухступенчатый регистровый наддув.

Представлены результаты работ ОАО «Коломенский завод» по созданию и совершенствованию среднеоборотных судовых дизелей 16Д49 в составе дизель-дизельных агрегатов 1ДДА12000. Выполнен анализ причин дымления дизелей на режимах разгона при работе на винт фиксированного шага. Обеспечена нормализация дымности отработавших газов за счет применения малоинерционных управляемых систем газотурбинного наддува регистрового типа, использования электронных регуляторов скорости, оптимизации алгоритма нагружения дизеля при приеме нагрузки. Ил. 7.

УДК 621.431

**Румб В.К.** Аналитическое определение минимально допустимого коэффициента запаса прочности при расчете деталей ДВС на выносливость // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 20–25.

**Ключевые слова:** детали ДВС, коэффициент запаса прочности, аналитический метод расчета, вероятность усталостного разрушения.

Предлагается расчетная методика определения коэффициента запаса прочности деталей ДВС при заданной вероятности отсутствия их усталостного разрушения. Ил. 3. Библ. 6.

УДК 621.436.12

**Ларцев А.М.** Оценка эффективных показателей двигателя воздушного охлаждения В-400 при его форсировании // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 26–29.

**Ключевые слова:** двигатель воздушного охлаждения, форсирование по мощности, эффективные показатели, измерение температур, оценка теплонапряженности головки цилиндра.

Приведены результаты экспериментальных исследований рабочих параметров при форсировании тяжелого тракторного двигателя воздушного охлаждения типа В-400 до мощности 500 л. с. Дана оценка надежности головки цилиндров по параметру теплонапряженности. Табл. 2. Ил. 2. Библ. 4.

УДК 621.434.038

**Тер-Мкртчян Г.Г., Мазинг М.В.** Современное состояние и перспективы развития топливной аппаратуры автотракторных дизелей // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 30–35.

**Ключевые слова:** дизели, нормы вредных выбросов, топливная аппаратура, аккумуляторная топливная система common rail, форсунка с мультипликатором давления, характеристики впрыскивания топлива.

Выполнен анализ влияния норм выбросов вредных веществ с отработавшими газами на развитие топливной аппаратуры автотракторных дизелей. Показано, что аккумуляторные системы типа common rail становятся основным типом топливной аппаратуры для транспортных дизелей различного назначения. Показаны перспективы развития комбинированных аккумуляторных систем с мультипликаторами давления, сочетающие достоинства систем common rail и гидроприводных насос-форсунок. Ил. 5. Библ. 7.

УДК 55.42.31; 55.03.33

**Задорожная Е.А., Маслов А.П.** Разработка элементов дизельного двигателя повышенной мощности на основе применения системы виртуальных испытаний // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 36–40.

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, топливная аппаратура, системы наддува, теплообменники, детали силовой схемы, подшипники скольжения, виртуальные испытания, CALS/ИПИ-технологии.

Представлены основные конструктивные и технические решения для повышения литровой мощности двигателей ООО «ЧТЗ-УРАЛТРАК» размерности 13/15 до 75 л. с. Дана оценка эффективности технических решений на основе результатов виртуальных испытаний с применением CALS/ИПИ технологий. Табл. 1. Ил. 4. Библ. 7.

УДК 621.74.047

**Марукович Е.И., Бевза В.Ф., Груша В.П., Красный В.А.** Формирование отливок из высокохромистого чугуна в металлической водоохлаждаемой форме // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 41–45.

**Ключевые слова:** чугун, кристаллизатор, направленное затвердевание, отливка, термическая обработка, структура, твердость.

Приведено описание принципиально нового высокопроизводительного метода литья трубчатых заготовок без применения стержня. Разработана технология и выполнен анализ структуры материала при формировании отливок из высокохромистого чугуна. Табл. 2. Ил. 6. Библ. 6.

УДК 621.43

**Масаки Окубо, Такуя Кувахара, Масаши Каван, Томоюки Куроки, Киениро Йошида, Кеничи Ханамото, Казутоши Сато.** Комплексная технология очистки выбросов судового дизеля с использованием холодной плазмы (материалы конгресса SIMAC 2013) // Двигателестроение. — 2014. — № 1. — С. 46–56.

**Ключевые слова:** судовые дизели, выбросы NO<sub>x</sub>, стандарт IMO Tier 3, генератор холодной плазмы, циклы адсорбции-десорбции.

Представлены результаты работ университета Osaka и фирмы «Daihatsu Diesel MFG. Co., Ltd.» (Япония) по созданию системы очистки отработавших газов судового дизеля от NO<sub>x</sub> и частиц с использованием холодной плазмы. Эффективность очистки газов обеспечивается периодичностью последовательных циклов адсорбции и десорбции NO<sub>x</sub>. Показано, что судовый дизель мощностью 1100 кВт при 900 об/мин, оборудованный системой очистки с генератором холодной плазмы, может обеспечить требования IMO Tier 3 по выбросам NO<sub>x</sub>. Максимальная потребляемая мощность реактора не превышает 5 % от мощности двигателя. Перевод доклада выполнен к.т.н. Г. Мельником. Табл. 2. Ил. 13. Библ. 13.

UDC 621.431

**Limonov A.K. OAO RUMO — a History 140 years-long** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 3–11.

**Keywords:** Velser & Co Engineering Works, Dvigatel Revolyutsii, OAO RUMO, 140th Anniversary.

Velser & Co Engineering Works, founded in 1874 in Riga, was later relocated to Nizhny Novgorod and renamed into Dvigatel Revolyutsii («Prime Mover of Revolution»). Today it is known as OAO RUMO. Nowadays the Company retains proprietary diesel engines' production, along with manufacturing of licensed MAN engines, thus participating in international cooperation.

15 ill., 1 table.

UDC 621.431

**Ryzhov V.A. and Pechenin V.V. Improvements in Type 16Д49 Diesel Engines Powering Type 1ДДА12000 Two-Engine Propulsion Unit Used in Series 20380 Corvette** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 12–19.

**Keywords:** medium-speed marine diesel engine, two-engine propulsion unit, transients, exhaust gas opacity, improvements in control systems, two-stage sectional turboboost.

Presented are the results of Kolomna Works project targeted at designing and improvement of medium-speed marine diesel engines type 16Д49 powering two-engine propulsion unit type 1ДДА 12000. In particular, the research included identification of a cause of smoky exhaust of engine (driving fixed pitch propeller through a gearbox) during transients. Smoke in exhaust was mitigated through use of low-inertia turbocharge systems, grouping of exhaust manifolds into individual sections, and optimization of engine loading ramp rate.

7 ill.

UDC 621.431

**Rumb V.K. Minimum Permissible Safety Factor in Structural Analysis of Diesel Engine Parts: Theoretical Approach** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 20–25.

**Keywords:** diesel engine parts, safety factor, analytical calculations, fatigue fracture probability.

A method is offered for analytical calculations of safety factor as applied to diesel engine parts, based on given probability of fatigue fracture prevention.

3 ill., 6 ref.

UDC 621.436.12

**Lartsev A.M. Performance of Forced Air-Cooled Engine Type B-400** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 26–29.

**Keywords:** air-cooled engine, engine uprating, performance, temperature measurement, estimation of thermal stress in cylinder head.

The result are given of investigation into type B-400 air-cooled diesel engine performance when uprated to 500 BHP. Cylinder head reliability is estimated based on thermal stress therein.

2 ill., 2 tables, 4 ref.

UDC 621.434.038

**Ter-Mkrtychyan G.G. and Mazing M.V. Fuel Injection Systems of Car-and-Tractor Diesel Engines: Current Status and Projection** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 30–35.

**Keywords:** diesel engines, air pollution limits, fuel injection systems, common rail system, pressure-boosted injector, fuel injection characteristics.

The article discusses progress in fuel injection systems of car-and-tractor diesel engines as a function of evolution in emission regulations. Common rail systems are shown as mainstream in modern diesel engines as far as mobile machinery is concerned. Also discussed is future development of accumulator systems with pressure-boosters, which combine advantages of common rail systems and hydraulically actuated pump-injector units.

5 ill., 7 ref.

UDC 55.42.31; 55.03.33

**Zadorozhnaya E.A and Maslov A.P. Virtual Tests as a Means to Design High-Powered Diesel Engine** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 36–40.

**Keywords:** diesel engine, fuel injection systems, supercharge systems, heat exchangers, load-bearing parts, shell bearings, virtual tests, CALS/IP technologies.

The article discusses engineering solutions designed to uprate diesel engines type 13/15 produced by OOO «ЧТЗ-УПАИТРАК» up to 75 BHP. Engineering solutions' efficiency was assessed by the results of virtual tests based on CALS/IP technologies.

4 ill., 1 tables, 7 ref.

UDC 621.74.047

**Marukovich E.I., Bevza V.F., Grusha V.G., and Krasny V.A. Moulding of High-Chromium Cast Iron in Metallic Water-Cooled Moulds** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 41–45.

**Keywords:** cast iron, directional solidification, cast product, thermal treatment, structure, hardness.

The article presents a new high-performance method of coreless tubular parts casting. A production process is developed, based on the analysis of high-chromium cast material structure.

6 ill., 2 tables, 6 ref.

UDC 621.43

**Masaaki Okubo, Takuya Kuwahara, Masashi Kawai, Tomoyuki Kuroki, Keiichiro Yoshida, Kenichi Hanamoto, Kazutoshi Sato. Total Marine Diesel Emission Control Technology Using Nonthermal Plasma Hybrid Process (Proceedings of CIMAC-2013)** // *Dvigatlestroyeniye*. — 2014. — № 1. — P. 46–56.

**Keywords:** marine diesel engines, NO<sub>x</sub> emission, IMO emission standard Tier III, nonthermal plasma generator, adsorptions/desorption cycles.

The article describes the research work carried out by Osaka Prefecture University and Daihatsu Diesel MFG. Co., Ltd., Japan, which resulted in the development of a PM and NO<sub>x</sub> simultaneous reduction aftertreatment system that employs a nonthermal plasma (NTP) hybrid process. Aftertreatment technology efficiency is ensured by periodical NO<sub>x</sub> adsorptions/desorption cycles. Marine diesel engine rated at 1100 kW @ 900 RPM featuring aftertreatment system with a nonthermal plasma generator is shown as able to meet IMO Tier 3 NO<sub>x</sub> emission standard. Nonthermal plasma generator power consumption does not exceed 5% of engine rated output.

The paper was translated into Russian by G.Melnik, PhD. 13 ill., 2 tables, 13 ref.

## Вниманию авторов

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

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

Тематика публикаций определила следующие основные рубрики журнала:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Все обозначения, встречающиеся в формулах, должны быть объяснены.

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

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

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

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

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

Публикация в журнале учитывается ВАК в качестве печатного научного труда.

Рукописи, направленные в редакцию, авторам не возвращаются.

*Редакция журнала*