

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛА МОДЕРНИЗАЦИИ ДИЗЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА ЧН21/21 ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ НОРМ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ

Л.А. Новиков, к.т.н., с.н.с.
ООО «ЦНИДИ-Экосервис»

Методами численного моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x выполнен анализ потенциала модернизации дизеля ЧН21/21 многоцелевого назначения по снижению выбросов NO_x до уровня, соответствующего действующим зарубежным стандартам, в том числе IMO-Tier 2.

Требуемый объем модернизации двигателя предусматривает замену топливной аппаратуры, включая ТНВД, форсунки и распылители, модернизацию или замену турбокомпрессора на более эффективный, изменение регулировок, влияющих на образование и выход NO_x . Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности. При этом удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу E2 снижается с 13,26 до 7,34 г/кВт·ч, при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч.

За прошедший год в нашей стране произошло несколько событий, способных изменить, а возможно и переломить многолетнюю устойчивую тенденцию разрушения отрасли отечественного судового, тепловозного и промышленного двигателестроения. Нарастивание отставания в технических и технологических производственных процессах привело к интенсивному вытеснению продукции отечественного производства с внутреннего рынка. В настоящее время рассматриваются сценарии использования двигателей зарубежного производства в военной технике и в составе объектов министерства обороны специального назначения и т. д. При этом захват российского рынка зарубежными производителями двигателей сопровождается настолько сильным идеологическим давлением в формировании общественного мнения о невозможности восстановить утраченные позиции отечественного двигателестроения, что не только традиционные потребители, но и многие специалисты отрасли в это уже поверили.

Однако в последнее время появилась надежда на возможность перехода к развитию отрасли. Во-первых, реальность полного разрушения

отрасли отечественного двигателестроения была наконец признана, а ее последствия осознаны на государственном уровне, в результате чего была разработана и в декабре 2011 г. стартовала федеральная целевая программа, направленная на развитие двигателей нового поколения и их компонентов. В указанной программе достаточно скромное место отведено работам по достижению перспективных норм вредных выбросов, хотя, как показывает практика, именно уровень экологических показателей современных двигателей является наиболее эффективным инструментом в конкурентной борьбе за рынки сбыта [1].

Во-вторых, постановлением Правительства РФ от 24 марта 2010 г. № 203 Россия присоединилась к Международной конвенции МАРПОЛ 73/78. Приложение VI к конвенции «О предотвращении выбросов с судов» предусматривает ограничение выбросов в атмосферу окислов азота (NO_x) от главных и вспомогательных судовых дизелей с 01.07.2010 г. на уровне IMO-Tier 2, что примерно на 20 % ниже аналогичной нормы по ГОСТ Р 51249 для двигателей, поставленных на производство после 01.01.2000 г., и на 40–50 % ниже нормы для двигателей, поставленных на производство до 01.01.2000 г. С учетом того, что примерно половина выпускаемых в нашей стране модификаций судовых двигателей поставлено на производство до 01.01.2000 г., требования международных стандартов, казавшиеся отдаленной перспективой, сразу же стали суровой реальностью и трудно разрешимой проблемой.

В сложившейся ситуации производители судовых двигателей уже не имеют более никакой возможности уклоняться от модернизации выпускаемой продукции, поскольку в соответствии с законодательством РФ производство продукции, не соответствующей вступившим в силу новым нормативным требованиям, должно быть остановлено.

1. Характеристика объекта модернизации и цели исследования

В качестве предполагаемого объекта модернизации выбран четырехтактный двигатель многоцелевого (в том числе судового) назначения,

тронковый, с открытой камерой сгорания и непосредственным впрыском топлива, газотурбинным наддувом и охлаждением наддувочного воздуха, ТНВД блочного типа и центрально расположенной форсункой закрытого типа в четырехклапанной крышке цилиндров, размером $S/D = 210/210$ мм. Судовые двигатели этой размерности, пока нашедшие применение только на кораблях ВМФ, выпускаются в исполнении V-6 и V-8 Уральским дизель-моторным заводом (ООО УДМЗ). Двигатели относятся к классу высокооборотных ($n = 1500$ об/мин), имеют в своем классе невысокий (относительно зарубежных аналогов), но вполне приемлемый уровень форсировки по среднему эффективному давлению (от 13,5 до 14,8 бар) и достаточно перспективный (по результатам анализа конструкции) потенциал модернизации. Самым существенным недостатком двигателей рассматриваемого класса является сверхнормативный уровень выбросов окислов азота, составляющий, в зависимости от эксплуатационной рабочей характеристики, от 12,6 до 13,3 г/кВт·ч, что примерно на 40 % превышает действующую с 01.07.2010 г. норму IMO-Tier 2.

Технические характеристики наиболее форсированной модификации двигателя семейства ЧН21/21, которые включают основные рабочие параметры, влияющие на уровень выбросов вредных веществ с отработавшими газами, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Техническая характеристика двигателей семейства ЧН21/21

Наименование параметра, размерность	Значение
Наибольшая цилиндровая мощность, кВт	134,5
Среднее эффективное давление, бар	14,82
Геометрическая степень сжатия	13,5
Максимальное давление в цилиндре, бар	158
Давление наддува (избыточное), кПа	168
Температура наддувочного воздуха за охладителем, °С	70
КПД турбокомпрессора, %	52,5
Коэффициент избытка воздуха	2,09
Геометрический угол опережения подачи топлива, град ПКВ до ВМТ	34^{+1}
Давление подъема иглы форсунки (максимальное давление впрыска топлива), бар	260 (680–700)
Максимальная среднemasсовая (локальная) температура рабочего тела в камере сгорания, К	1790 (2580–2600)
Количество и диаметр сопловых отверстий распылителя, мм	8 отв. $\varnothing 0,4$
Номинальный удельный эффективный (средневзвешенный по испытательному циклу E2) расход топлива, г/кВт·ч	210 (213,6)
Номинальный удельный (средневзвешенный по испытательному циклу E2) выброс NO_x , г/кВт·ч	11,89 (13,26)
Норма выброса NO_x (IMO-Tier 2), г/кВт·ч	8,18

Главная цель настоящего аналитического исследования состоит в оценке принципиальной возможности нормализации показателей вредных выбросов двигателей семейства ЧН21/21 при максимально возможном сохранении конструкции силовых элементов КШМ, деталей камеры сгорания, а также рабочих параметров, определяющих топливную экономичность и ресурсные показатели. Для достижения поставленной цели в условиях, когда у производителя отсутствует необходимая экспериментальная база, имеется единственно возможное средство — численное моделирование рабочего процесса и кинетики образования NO_x в цилиндре дизеля.

С учетом значительных пробелов в типаже судовых высокооборотных двигателей отечественной конструкции и постройки цель исследования представляется крайне актуальной и своевременной. В случае нахождения приемлемого решения по нормализации показателей выбросов NO_x конкурентоспособность двигателей семейства ЧН21/21 может быть значительно повышена, а область применения расширена за счет возможности установки на судах коммерческого морского и рыболовецкого флота.

2. Анализ параметров рабочего процесса, влияющих на уровень выбросов NO_x

Исходные универсальные характеристики изменения удельного эффективного расхода топлива b_e (г/кВт·ч) и концентрации NO_x (ppm) в поле возможных режимов работы дизеля ЧН21/21 приведены на рис. 1. Универсальные характеристики (приведена только часть из них) позволяют наиболее надежно диагностировать характерные особенности и недостатки рабочего процесса в части организации смесеобразования и сгорания топлива. Применительно к поиску возможных путей решения поставленной задачи, а именно снижения образования NO_x при сохранении топливной экономичности и максимального давления в цилиндре p_z , можно отметить следующие характерные особенности внутрицилиндровых процессов объекта исследований.

В поле универсальных характеристик (см. рис. 1) имеются два характерных и несовпадающих экстремума: минимума удельного эффективного расхода топлива b_e (находится вблизи режима полной мощности) и максимума концентрации NO_x , смещенного в зону минимальных частот вращения и находящегося вблизи границы помпажа турбокомпрессора. Другой особенностью приведенных экспериментальных данных является слабо выраженный рост концентрации NO_x по номинальной нагрузочной характеристике с ростом среднего эффективного давления p_{me} при заметном снижении удельного эффективного расхода топлива b_e . Отмеченные особенности

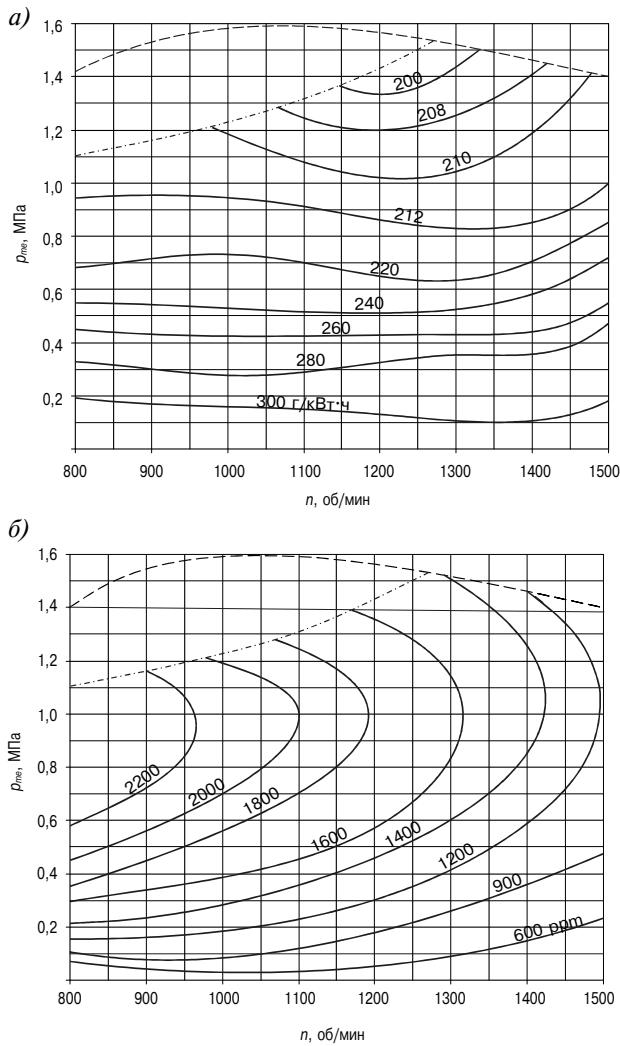


Рис. 1. Универсальные характеристики дизеля ЧН21/21: а — b_e , г/кВт·ч; б — концентрация NO_x , ppm

нарушают общую закономерность вида $\text{NO}_x \rightarrow \eta_e \cdot \text{const}$, природа которой сегодня общеизвестна и обычно строго соблюдается в пределах допустимого изменения рабочих параметров.

Наиболее вероятная причина нарушения закономерности $\text{NO}_x \rightarrow \eta_e \cdot \text{const}$ состоит в следующем: неполнота использования располагаемого воздушного заряда; горение топлива в периферийной, наиболее глубокой части камеры сгорания с возможным попаданием части топлива на стенку камеры (частично пленочное смесеобразование). Это подтверждается стабильно высоким уровнем выхода NO_x , а также близким к предельно допустимому значению уровнем дымности отработавших газов. Рассмотренный характер процесса является следствием слишком раннего и растянутого по углу поворота коленчатого вала впрыском топлива, чрезмерной дальностью топливного факела, слабой турбулентностью рабочей смеси в стадиях основного горения и догорания топлива.

Отмеченные особенности рабочего процесса дизелей семейства ЧН21/21 были экспериментально подтверждены физическим моделированием смесеобразования в «холодной бомбе» и визуализацией процесса горения топлива на установке с прозрачными окнами «Призма», моделирующей процесс горения топлива в динамике. С учетом ограниченного объема журнальной публикации приведение всех имеющихся данных нецелесообразно и избыточно для достижения основной цели настоящего исследования.

3. Аппарат математического моделирования

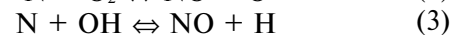
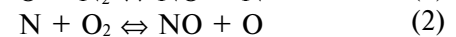
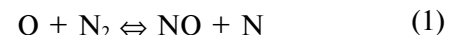
Программный комплекс, разработанный для численного моделирования внутрицилиндровых процессов в дизелях, состоит из трех объединенных программ:

- IMPULS — моделирование индикаторных эффективных показателей рабочего процесса;
- FAKEL — моделирование динамики развития топливного факела, распределения топлива в объеме камеры сгорания, формирование локальных зон горения топлива;
- NO-DIESEL — моделирование неравновесной кинетики образования NO_x при сгорании различных топлив в дизелях по зональной модели.

Наиболее подробно разработанный комплекс программ рассмотрен в работе [2], поэтому здесь ограничимся рассмотрением только тех его фрагментов, которые необходимы для понимания процедуры расчета и анализа полученных результатов.

Первая из программ широко известна. Основана она на классической термодинамической теории ДВС и используется во многих научных школах, различаясь лишь в деталях, касающихся в основном способов задания закона тепловыделения при горении топлива.

Моделирование неравновесной кинетики образования NO в дизелях при горении газообразных углеводородных топлив описываются с помощью расширенного механизма Я.Б. Зельдовича [3]:



который при условии квазистационарности концентрации атомарного кислорода приводит к следующему выражению для скорости образования NO :

$$W_{\text{NO}} = \frac{2 \cdot k_1 [\text{O}] \cdot [\text{N}_2]}{1 + k_{-1} [\text{NO}] \cdot b / (k_{-2} [\text{O}_{-2}])} - \frac{2 \cdot k_2 [\text{NO}] \cdot [\text{O}]}{1 + k_{-2} [\text{O}_2] / (k_{-1} [\text{NO}] \cdot b)}, \quad (4)$$

где k_i , k_{-i} — константы скоростей прямой и обратной i -й реакции;

$$b = \left\{ 1 + \frac{k_3 [\text{OH}]}{k_{-2} [\text{O}_2]} \right\}^{-1} \quad (5)$$

Из-за большой энергии активации окисление азота идет намного медленнее, чем окисление горючего. Поэтому при проведении практических расчетов для нахождения концентраций, входящих в формулы (4), (5), и температуры, определяющей значения констант скоростей, привлекается предположение о том, что окись азота образуется в термодинамически равновесных (за исключением NO и N) продуктах сгорания, т. е. в условиях, когда все основные химические реакции, кроме реакций (1)–(3) приходят в состояние равновесия.

Опираясь на расширенный механизм Я.Б. Зельдовича, задачу вычисления концентрации окиси азота в фиксированный момент времени t пребывания пробы газа в высокотемпературных продуктах сгорания углеводородных топлив целесообразно разбить на два этапа.

Первый этап состоит в расчете состава термодинамически равновесных (за исключением NO и N) продуктов сгорания, а затем полученные концентрации компонентов и температура используются при численном интегрировании уравнения первого порядка:

$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = W_{\text{NO}}, \quad (6)$$

где W_{NO} задается выражениями (4), (5).

Кинетика образования окислов азота в цилиндре дизеля по приведенной выше модели рассчитывается с учетом развития топливного факела во времени и пространстве с разбивкой заряда на характерные зоны горения топлива, отличающиеся коэффициентом избытка воздуха.

Расчет количества и объема характерных зон горения, сформированных за период задержки самовоспламенения, а также соотношения в этих зонах воздуха и топлива выполняется на основе современных представлений о развитии топливных струй с учетом следующих допущений.

При впрыске в камеру сгорания дизеля струи топлива она распадается на мелкие капли, которые быстро испаряются. Подготовленная горючая смесь разбивается на зоны, в пределах которых состав смеси приблизительно постоянный. Воспламенение носит многоочаговый характер и охватывает все подготовленное для сгорания топливо (рис. 2).

В предлагаемой модели струя топлива рассматривается как струя пара. При возникновении воспламенения камера разделена на зоны: свободная зона A (воздух и остаточные газы); богатое топливом ядро струи C ; несколько (достаточно 10 для каждого факела) промежуточных зон B_i , отличающихся между собой соотношением

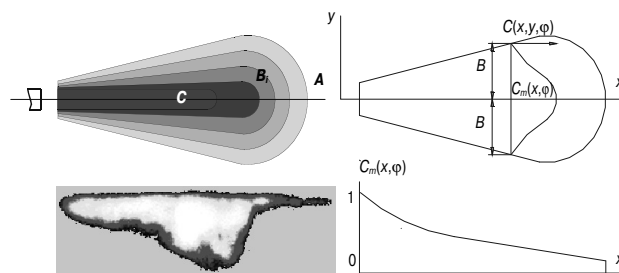


Рис. 2. Схема развития струи топлива для расчета образования NO по зональной модели

топлива и воздуха. При этом турбулентность в процессе горения учитывается коэффициентом частичного взаимного перемешивания промежуточных зон B_i .

Смесь воспламеняется и выгорает при различных температурах, определяемых локальным соотношением воздуха и топлива. В качестве примера, подтверждающего адекватность принятых допущений, на рис. 2 приведен фрагмент скоростной кинограммы процесса горения топлива в камере сгорания экспериментального двигателя «Призма» с прозрачными окнами широкого обзора.

В модели топливо-воздушной струи используются эмпирические уравнения для глубины проникновения струи (L_c) и скорости расширения струи (B_i). Принимается нормальное распределение отношения топлива к воздуху в поперечном сечении струи и гиперболическая зависимость распределения топлива вдоль струи. Поскольку общее количество впрыснутого топлива сохраняется в струях, то в соответствии с указанным выше временным и пространственным распределением топлива в струе определяются границы зон горения.

Длина струи описывается следующим уравнением:

$$L_c = F [(\varphi - \varphi_{\text{он}})/6n]^{0,8}, \quad (7)$$

$$F = \frac{450 \cdot d_c^{0,5} \cdot \left(\frac{\rho_b}{\rho_d}\right)^{0,4} \cdot \left(\frac{\rho}{\rho_a}\right)^{0,5} \cdot (p_j - p)^{0,25}}{\left(1 + \frac{\rho}{\rho_a}\right)^{0,85}},$$

где d_c — диаметр соплового отверстия; ρ_b, ρ_d — плотность эталонного и дизельного топлива; ρ_a — плотность газа в цилиндре и атмосферного воздуха; p, p_j — давления газа в цилиндре и топлива перед сопловым отверстием; $\varphi, \varphi_{\text{он}}$ — текущий угол ПКВ и угол опережения подачи топлива; n — частота вращения.

Интенсивность расширения струи описывается следующим уравнением:

$$dB/dx = \frac{K}{2} \cdot \left(1 + \frac{p}{p_j}\right), \quad (8)$$

где K — постоянная, зависящая от формы камеры сгорания.

В модели предполагается, что в период высокотемпературной стадии процесс горения слабо влияет на траекторию и форму струи.

4. Результаты моделирования

Первый этап моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в камере сгорания дизеля предусматривает настройку модели и оценку ее адекватности исследуемому объекту. Расчетная индикаторная диаграмма и суммарный расчетный выход NO_x на режиме максимальной длительной мощности дизеля ЧН21/21 при значениях исходных данных, обозначенных в табл. 1, приведен на рис. 3.

Результаты моделирования показывают, что при характерном для дизеля ЧН21/21 раннем впрыске топлива процесс активного окисления азота начинается примерно за 20 град до ВМТ в период основного сгорания, что позволяет значительно разогнать прямую реакцию образования NO с достижением максимального значения скорости вблизи ВМТ. При этих условиях диссоциация хотя и имеет место после прохождения пика давления, но к моменту «заковки» наработанное количество NO остается на очень высоком уровне.

Дифференциальные составляющие интегральной характеристики процесса образования NO_x приведены на рис. 4.

Выходным параметром моделирования является абсолютная масса NO , выраженная в мг, и наработанная за рабочий цикл в каждой локальной зоне, а общая наработанная в объеме цилиндра масса (24 мг/цикл) суммируется по зонам (рис. 4, а). Локальная объемная концентрация NO , выраженная в ppm, находится как частное

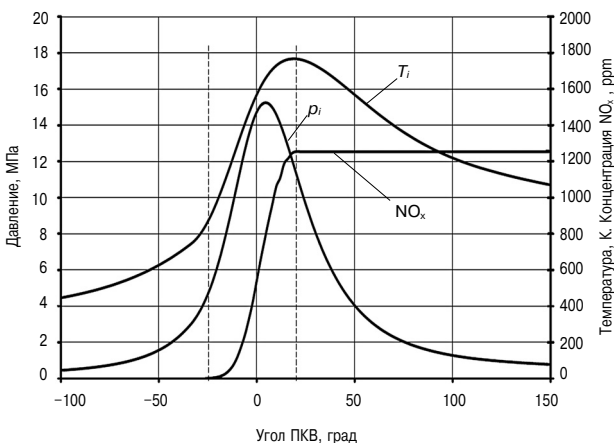
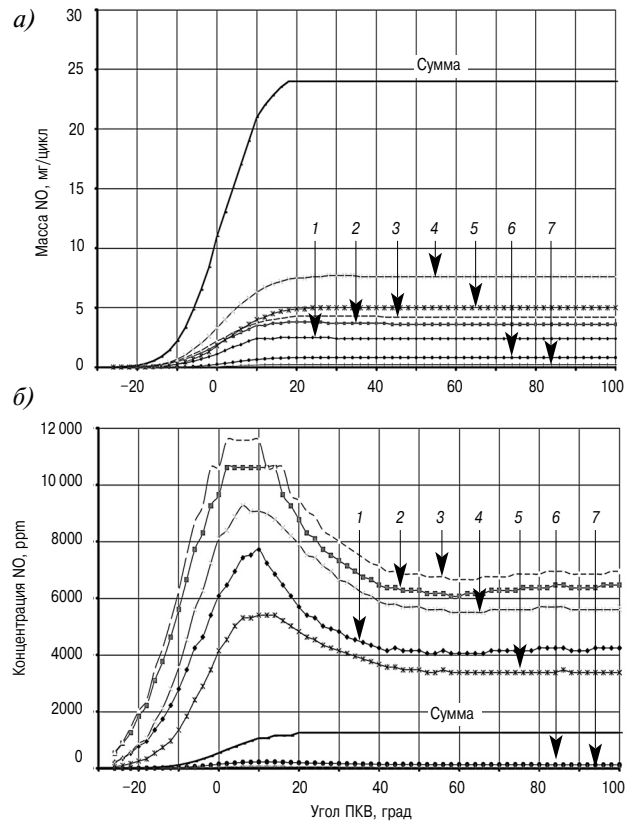


Рис. 3. Процесс образования NO_x в цилиндре серийного дизеля ЧН21/21 ($p_{me} = 14,8$ бар; $n = 1500$ об/мин)



№ зоны	1	2	3	4	5	6	7
Объем, V/V	0,040	0,055	0,075	0,120	0,175	0,235	0,305
α	0,85	1,00	1,15	1,30	1,45	2,00	3,00

Рис. 4. Образование NO в локальных зонах камеры сгорания серийного дизеля ЧН 21/21 ($p_{me} = 14,8$ бар; $n = 1500$ об/мин)

от деления наработанной массы на соответствующий объем локальной зоны (рис. 4, б).

Анализ результатов моделирования с использованием абсолютных величин (наработанных масс NO) позволяет избавиться от некоторых заблуждений, согласно которым для радикального снижения выбросов NO_x достаточно ликвидировать (размыть) за счет турбулизации заряда только локальные высокотемпературные зоны горения с коэффициентом избытка воздуха α , близким к стехиометрическому (в нашем случае это зоны с 1 по 3). Действительно, в этих зонах, занимающих объем примерно 16,5 %, наблюдается наиболее высокая локальная температура, достигающая 2450–2600 К, и создается объемная концентрация NO , многократно превышающая среднюю по цилиндру (1265 ppm). Однако масса NO , наработанная суммарно в этих трех зонах, составляет 10,5 мг, в то время как в зонах 4 и 5, с более низкой температурой, но имеющих почти вдвое больший объем, нарабатывается 12,5 мг NO , т. е. более половины от общей массы. Анализ условий горения показывает, что наибольший массовый выход NO наблюдается именно в зонах с локальным коэффициентом из-

бытка воздуха α в диапазоне от 1,15 до 1,45, объем которых превышает половину объема камеры сгорания. Если для снижения локальных высокотемпературных зон горения попытаться использовать вращение заряда в камере сгорания, то за счет снижения объема локальных зон стехиометрического состава прежде всего увеличивается объем локальных зон с наибольшим выходом NO , в результате чего суммарный выход NO только увеличивается, что неоднократно подтверждалось на практике.

Для оценки адекватности разработанной модели исследуемому объекту, на рис. 5 представлена экспериментальная номинальная нагрузочная характеристика дизеля ЧН21/21 в сравнении с результатами математического моделирования. На основных нагрузочных режимах максимальная относительная погрешность совпадения результатов моделирования выхода NO_x с экспериментальными данными не превышает $\pm 6\%$, что достаточно точно соответствует реальному объекту, учитывая что относительная погрешность измерения выбросов NO_x современными автоматическими газоанализаторами составляет $\pm 5\%$.

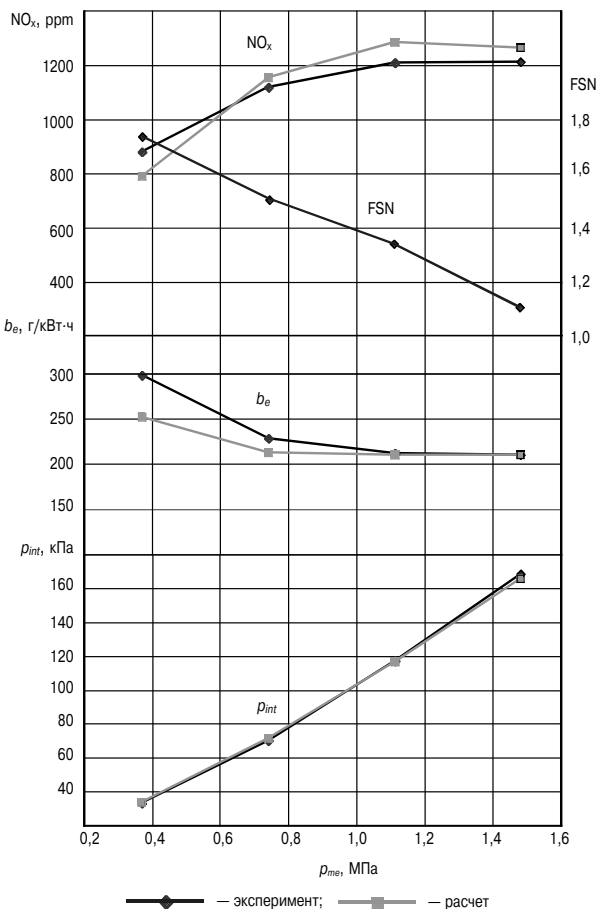


Рис. 5. Нагрузочная характеристика серийного дизеля ЧН21/21

Некоторое расхождение в значениях удельного эффективного расхода топлива на режиме с нагрузкой 25 % от номинальной ($p_{me} = 0,37$ МПа) объясняется тем, что моделирование параметров рабочего процесса осуществляется исходя из предположения объемного смесеобразования, в то время как при снижении нагрузки в реальном объекте присутствует объемно-пленочного смесеобразование, что подтверждается ростом дымности отработавших газов при снижении нагрузки до максимального значения $\text{FSN} = 1,75$. Все остальные параметры моделирования имеют достаточно высокую степень сходимости с данными эксперимента.

5. Основные направления и ожидаемый результат модернизации

Для нормализации показателей выбросов дизелей семейства ЧН21/21 с достижением уровня IMO-Tier 2 (т. е. снижение не менее чем на 40%), требуется существенное изменение регулировок, рабочих параметров и компонентов, влияющих на образование и выход NO_x . При этом воздействие на кинетику образования NO должно быть направлено на снижение общего температурного уровня рабочего процесса и температурного градиента в камере сгорания за счет целенаправленного воздействия топлива на процесс горения в следующих основных направлениях:

- сокращение продолжительности подачи топлива и улучшение качества его распыливания за счет повышения давления впрыска до значения не менее 1200 бар при смещении начала подачи ближе к ВМТ не менее чем на 10 градусов;
- повышение качества распыливания топлива за счет уменьшения диаметра, но при сохранении калибра и суммарной эффективной площади сечения сопловых отверстий распылителя;
- снижение степени сжатия до 13 (в том числе за счет изменения формы камеры сгорания) при одновременном повышении давления наддува и КПД турбокомпрессора до 62–65 %;
- повышение охлаждения воздушного заряда за счет расширения при впуске и наполнении цилиндра при более высоком наддуве и с более поздним закрытием впускных клапанов.

Необходимый объем модернизации в вышеперечисленных направлениях был определен на основании предварительно выполненных промежуточных расчетов, результаты которых позволили выявить критичные компоненты, требующие коренной модернизации или замены на более эффективные.

Топливный насос высокого давления (ТНВД) блочного типа требуемой производительности с давлением впрыска не менее 1200 бар подобрать достаточно сложно даже в номенклатуре изделий зарубежного производства. Поэтому его целесо-

**Расчетные показатели
модернизированного дизеля ЧН21/21**

Наименование параметра, размерность	Значение
Наибольшая цилиндровая мощность, кВт	134,5
Среднее эффективное давление, бар	14,82
Геометрическая степень сжатия	13,0
Максимальное давление в цилиндре, бар	155
Давление наддува (избыточное), кПа	235
Температура наддувочного воздуха за охладителем, °С	65
КПД турбокомпрессора, %	62,5
Коэффициент избытка воздуха	2,36
Геометрический угол опережения подачи топлива, град ПКВ до ВМТ	23 ⁺¹
Давление подъема иглы форсунки (максимальное давление впрыска топлива) бар	280 (1200)
Количество и диаметр сопловых отверстий распылителя, мм	10 отв. Ø 0,35
Максимальная среднemasсовая (локальная) температура рабочего тела в камере сгорания, К	1455 (2320)
Номинальный удельный эффективный (средневзвешенный по испытательному циклу E2) расход топлива, г/кВт·ч	208 (211,6)
Номинальный удельный (средневзвешенный по испытательному циклу E2) выброс NO _x , г/кВт·ч	6,86 (7,34)

образно заменить на индивидуальные ТНВД, что более соответствует традициям проектирования судовых и промышленных дизелей. Выбор форсунок и распылителей на расчетное давление с числом сопловых отверстий не менее 10 и Ø 0,32–0,34 мм достаточно широко представлен в номенклатуре продукции фирм «Bosch» или «L'orange». Снижение степени сжатия на первом этапе может быть выполнено без изменения конфигурации камеры сгорания, хотя ее периферийная зона представляется излишне глубокой. В случае невозможности повышения КПД серийного базового турбокомпрессора как минимум до 62 % его также целесообразно заменить на более эффективный агрегат зарубежного производства.

Реализация планируемых конструктивных изменений для нормализации показателей выбросов NO_x, как было показано выше, может быть выполнена за счет замены комплектующих элементов при минимальных изменениях, вносимых в базовую конструкцию двигателя ЧН21/21. В процессе первоначальной модернизации топливной системы предпочтение, на наш взгляд, может быть отдано использованию механических систем топливоподачи с учетом возможной области специального применения двигателей семейства ЧН 21/21, допускающей воздействие мощного электромагнитного импульса.

Заключительный этап моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в камере сгорания модернизированного дизеля предусматривает получение расчетных нагрузочных характеристик с учетом внесенных конструктивных изменений и новых регулировок (табл. 2)

Расчетная индикаторная диаграмма и суммарный расчетный выход NO_x на режиме максимальной длительной мощности модернизированного дизеля ЧН21/21 при значениях рабочих параметров, полученных в результате моделирования и сведенных в табл. 2, приведен на рис. 6.

Результаты моделирования демонстрируют кардинальное количественное изменение параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x в дизеле после его модернизации. Параметры рабочего процесса были выбраны таким образом, чтобы максимальное давление в цилиндре p_z осталось на прежнем уровне (153 бар). Более поздний интенсивный впрыск топлива обеспечивает снижение максимальной температуры цикла T_z с 1790 до 1455 К и смещает процесс активного окисления азота за ВМТ. При этом высокотемпературная стадия процесса сгорания топлива, при которой сохраняется подвижность реакции образования NO, заканчивается к 30 град

ПКВ за ВМТ, т. е. после прохождения пиков давления и температуры. Нарботанное количество NO снижается с 24 до 15 мг/цикл, а объемная среднemasсовая концентрация NO_x не превышает 600 ppm.

Рабочие параметры расчетной нагрузочной характеристики модернизированного дизеля ЧН21/21 приведены на рис. 7, который убедительно демонстрирует реальность достижения поставленной цели аналитического исследования — соответствие двигателя значению нормы выбросов NO_x IMO-Tier 2.

Удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу E2 (цикл испытаний главных судовых двигателей) составляет 7,34 г/кВт·ч при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч. Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности, которая в результате модернизации имеет тенденцию к улучшению в сравнении с экономичностью серийного двигателя. Расчеты показывают, что при достигнутом уровне рабочих параметров норма выбросов NO_x не будет превышена также при испытаниях двигателя по циклу D2, применяемому в испытательной процедуре для промышленных и судовых дизель-генераторов.

Безусловно, при проведении реальной модернизации, экспериментально полученные значения рабочих параметров могут не в полной мере соответствовать их расчетным значениям, полученным средствами математического моде-

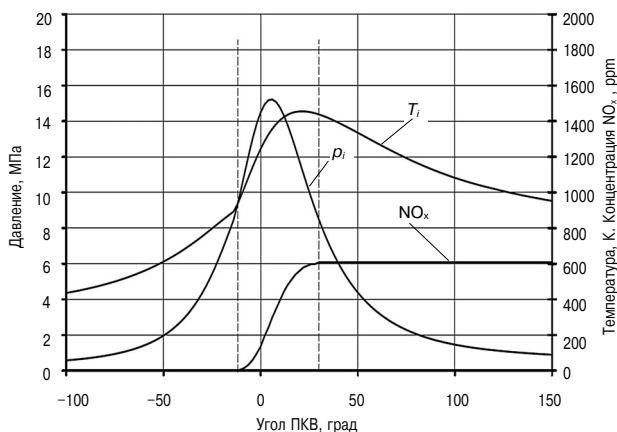


Рис. 6. Процесс образования NO_x в цилиндре модернизированного дизеля ЧН21/21 ($p_{me} = 14,8$ бар; $n = 1500$ об/мин)

лирования. В конечном итоге целью аналитического исследования является выбор направления и расчетная оценка потенциала модернизации уже созданной и надежно работающей конструкции. При этом необходимо принимать во внимание, что для дальнейшего снижения выбросов NO_x имеются и другие пока не задействованные резервы, такие как повышение глубины охлаждения наддувочного воздуха, изменение фаз газораспределения, оптимизация формы камеры сгорания и в конечном итоге применение электронно-управляемой системы common rail с опцией многофазного впрыска топлива.

6. Заключение

Методами численного моделирования параметров рабочего процесса и кинетики образования NO_x выполнен анализ потенциала модернизации дизеля ЧН21/21 многоцелевого назначения по снижению выбросов NO_x до уровня, соответствующего действующим зарубежным стандартам, в том числе IMO-Tier 2.

Показана принципиальная возможность нормализации показателей вредных выбросов двигателей семейства ЧН21/21 при максимальном сохранении конструкции силовых элементов кривошипно-шатунного механизма, деталей камеры сгорания, а также рабочих параметров, определяющих топливную экономичность и ресурсные показатели.

Требуемый объем модернизации двигателя предусматривает необходимость замены топливной аппаратуры, включая ТНВД, форсунки и распылители, модернизацию или замену турбокомпрессора на более эффективный, изменение регуляторов, влияющих на образование и выход NO_x .

Показано, что нормализация показателей выбросов NO_x может быть выполнена без потери топливной экономичности, которая в результате модернизации имеет тенденцию к улучшению,

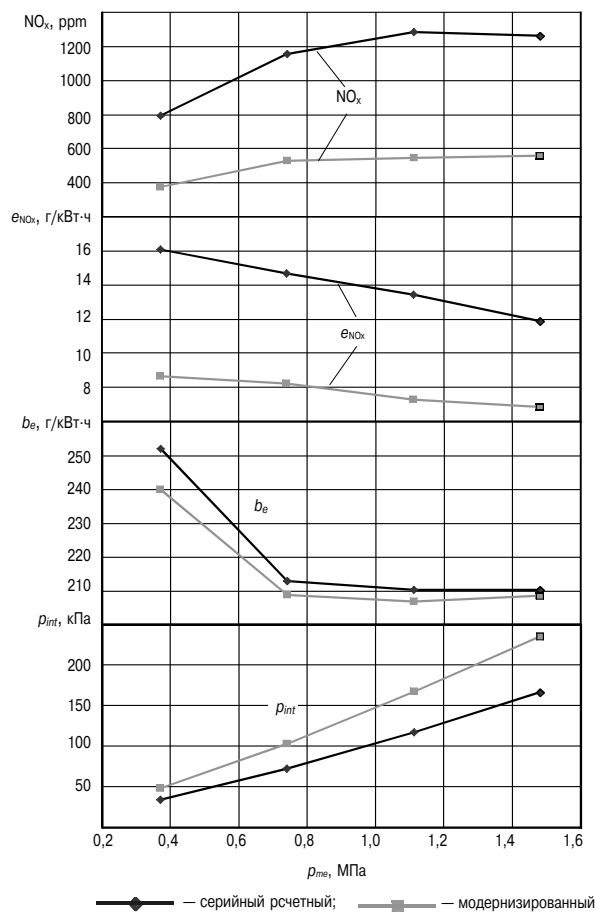


Рис. 7. Расчетные нагрузочные характеристики серийного и модернизированного дизеля ЧН21/21

в сравнении с экономичностью серийного двигателя. При этом удельный средневзвешенный выброс NO_x по испытательному циклу E2 снижается с 13,26 до 7,34 г/кВт·ч при значении нормы IMO-Tier 2, равной 8,18 г/кВт·ч.

С учетом значительных пробелов в типаже судовых высокооборотных двигателей отечественной конструкции и постройки, конкурентоспособность модернизированных двигателей семейства ЧН21/21 может быть значительно повышена как на внутреннем, так и на зарубежных рынках, а область их применения расширена за счет возможности установки на судах коммерческого морского и рыбопромыслового флота.

Литература

1. Новиков Л.А. Показатели вредных выбросов как средство конкурентной борьбы за рынок судовых и промышленных дизелей // Двигателестроение. — 2010. — № 3 (241). — С. 18–21.
2. Новиков Л.А. Экономические проблемы создания малотоксичных транспортных двигателей // Жизнь и безопасность. — 2000. — № 3–4. — С. 155–177.
3. Зельдович Я.Б., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. — М.: Изд. АН СССР, 1947. — 147 с.