

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБЛИКА СУДОВОГО ВЫСОКОБОРОТНОГО ДИЗЕЛЯ

*А.А. Иванченко, д.т.н., профессор; И.А. Щенников, аспирант  
ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова*

В статье рассматривается метод определения технического облика судового дизеля на раннем этапе его проектирования. Для оценки уровня качества конструктивных вариантов предлагается использовать модель типа «черный ящик», в основу которой положено определение комплексного показателя качества на основании количественных и качественных характеристик аналогов с использованием функции Харрингтона. Для определения некоторых прогнозируемых параметров выполнено математическое моделирование различных вариантов конструкций высокооборотного дизеля цилиндровой мощностью 140 кВт. Проведена комплексная оценка качества трех наиболее реальных вариантов конструкции. Показана принципиальная возможность метода для предварительной оценки перспективной размерности.

Высокая конкуренция на международном рынке судовых дизелей требует от производителей внедрения систем управления качеством не только на этапе производства, но и проектирования. В то же время вопросы управления качеством на ранних стадиях проектирования, определяющие технический облик конструкции создаваемого двигателя, оказались не достаточно изученными.

По своей сути определение технического облика проектируемого судового дизеля является сложной многопараметрической задачей, при решении которой важно выбрать такие проектные и организационные решения, которые в последующем обеспечат высокую конкурентоспособность разрабатываемой конструкции. Как правило, одним из критериев принятия решения о начале проектирования нового типоразмерного ряда судовых дизельных двигателей является понимание текущей технической ситуации и тенденций развития планируемого рынка сбыта. В то же время их можно получить, используя принципы научно-технического прогнозирования и управления качеством продукции.

В настоящее время в дизелестроении нашли применение известные методы научно-техниче-

ского прогнозирования: структурное исследование, исследование предельных значений, экстраполяция тенденций, моделирование, экспертные оценки [1, 2]. Все они включают в себя синтез определяющих признаков продукции с их дальнейшим анализом, при этом могут рассматриваться как качественные, так и количественные признаки продукции, причем каждый признак продукции должен характеризовать ее определенные свойства, входящие в характеристику качества продукции. С другой стороны, в соответствии с принципами управления качеством продукции при подготовке технического задания на ее разработку для сравнительной оценки принято использовать комплексный показатель качества продукции.

В проблемно-ориентированной научной литературе [3, 4] для решения подобного рода задач рассматривают различную совокупность показателей качества, рекомендуя при этом для сравнительных исследований использовать, как правило, комплексный показатель качества продукции, вычисленный методом среднего взвешенного.

При определении технического облика двигателя на ранней стадии проектирования основное внимание уделяется признакам, характеризующим его конструкцию, не уделяя должного внимания признакам, характеризующим производственные и кадровые возможности предприятия-изготовителя, а также текущее состояние развития отрасли, учет которых на этом этапе возможен только в качественной (описательной) форме.

Определение комплексного показателя качества, который бы всесторонне характеризовал конструкцию и потребительские свойства проектируемого судового дизельного двигателя, предполагает применение системной комплексной модели. Составление такой модели на начальных этапах проектирования представляет собой задачу исключительной сложности, так как требует досконального знания механизмов изучаемых явлений и процессов. Вместе с тем положительный результат может быть достигнут и при недостаточно полном знании некоторых механизмов и явлений в случае использования для анализа оцениваемых признаков кибернетического

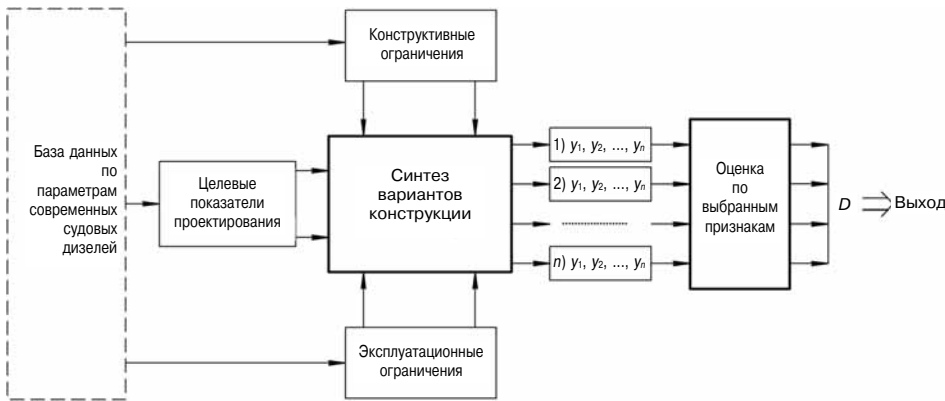


Рис. 1. Модель к задаче оценки технического облика судового высокооборотного дизеля

метода «черного ящика», в основе которого могут быть заложены различные механизмы трансформации получаемой на входе информации.

В основу разработки предлагаемой методики положены работы [3–8] по прогнозированию и оценке качества дизельных установок и их элементов. В качестве методической основы проводимого исследования использованы принципы научно-технического прогнозирования и управления качеством продукции. При этом в основу определения качества создаваемого дизеля как технической системы положено использование прямых экспертных оценок и последующей их математической обработки с использованием функции Харрингтона.

В общем виде кибернетическая система рассматриваемой модели, представлена на рис. 1.

Учитывая многообразие факторов, определяющих технический облик создаваемого судового дизеля как параметра модели, последний представлен в виде функции 3-х групп аргументов: целевых, конструктивных, эксплуатационных факторов, на основе которых происходит синтез вариантов конструкции. При этом каждый вариант включает в себя набор частных количественных ( $y_1–y_3$ ) и качественных ( $y_4–y_{12}$ ) признаков,

характеризующих техническое решение и подлежащих оценке через соответствующие потенциалы  $d_j$  (рис. 2). Выбор основных признаков определяется на основании экспертного опроса, статистических и прогнозных данных.

Основной задачей описания функционирования рассматриваемой системы является введение характеристики уровня технического решения по создаваемому двигателю в виде числа, которое давало бы возможность оценить насколько эффективно обеспечивается достижение поставленных целей. Анализ математических моделей, методик оценки и выбора наиболее рациональных решений позволил принять в качестве функции оценки зависимость вида (1):

$$D_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n d_{ij}}, \quad (1)$$

где  $n$  — число частных показателей.



Рис. 2 Номограмма перевода показателей в безразмерные числа

Выражение для расчета значений  $d_i$  (или кривая желательности, см. рис. 2) для  $i$ -го оцениваемого технического решения по дизелю  $j$ -й совокупности частных признаков оценки имеет вид:

$$d_{ij} = \exp\left[-\left(e^{y_{ij}}\right)\right], \quad (2)$$

где:  $y_{ij}$  — безразмерное значение  $i$ -го показателя для  $j$ -го варианта рассматриваемой совокупности признаков.

Численные значения кривой желательности характеризуются следующим образом:  $d = 1,00$  — уровень значения показателя  $y_i$ , обеспечивающий максимально возможный положительный эффект;  $1,00 > d > 0,80$  — реально достигнутый уровень значений показателя  $y_i$ , обеспечивающий наибольший положительный эффект;  $0,80 > d > 0,60$  — допустимый и довольно высокий уровень значения показателя  $y_i$ ;  $0,60 > d > 0,37$  — допустимый и достаточный уровень значения показателя  $y_i$ ;  $0,37 > d > 0$  — реально достигнутый наихудший уровень значения показателя;  $d = 0$  — значение  $y_i$ , при котором сравнение выбранных показателей заведомо неприемлемо для реализации.

Для получения исходных данных, лежащих в основе предлагаемой методики, выполнены исследования по выбору признаков оценивания технического облика вновь создаваемого судового дизеля и анализ перспективных направлений их развития.

Приняты следующие основные параметры, характеризующие конструкцию и эксплуатационную эффективность дизеля [8–12]: среднее эффективное давление —  $p_{me}$ ; удельный расход топлива —  $b_e$ ; удельная масса двигателя —  $m_{уд}$ ; скорость поршня —  $c_m$ ; цилиндровая мощность —  $P_{ц}$ ; обороты коленчатого вала —  $n$ ; отношение хода поршня к диаметру цилиндра —  $s/d$ ; степень сжатия —  $\epsilon$ ; степень повышения давления —  $\lambda$ ; максимальное давление сгорания —  $p_{max}$ ; максимальная среднemasсовая температура цикла —  $T_{max}$ ; температура отработавших газов —  $T_g$ .

В ходе исследований пределы изменения выбранных параметров рассматривались в границах, достигнутых в современных высокооборотных судовых дизелях. Конструктивные ограничения приняты в виде  $s/d$  от 1,1 до 1,26 и  $\epsilon$  в пределах 12–16. В качестве параметров, косвенно характеризующих тепловую и механическую напряженность судового двигателя в эксплуатационных условиях, рассматривались:  $c_m$  в диапазоне 10–13 м/с;  $p_{max}$  в диапазоне 15–23 МПа;  $\lambda$  в пределах от 1,05 до 1,3;  $T_{max}$  и  $T_g$  соответственно в пределах до 1900 и 873 К.

В качестве целевых показателей проектирования в модели рассматриваются показатели  $P_{ц}$ ,

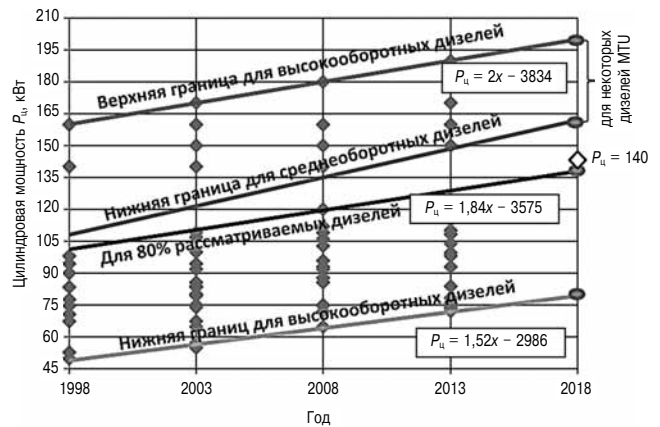


Рис. 3. Статистика и прогноз изменения  $P_{ц}$  для высокооборотных судовых дизелей

$n$  и  $p_{me}$ . Данные параметры во многом определяют конструкцию и назначение дизеля. Выбор величины  $P_{ц}$  связан с необходимостью определения потребителей разрабатываемой конструкции дизеля.

Для выбора  $P_{ц}$  были проанализированы данные по 17 судовым высокооборотным дизелям, выпускаемым с 1998 по 2013 г. с составлением прогноза на период до 2018 г. (рис. 3).

Установлено, что в перспективе до 2018 г. судовые высокооборотные дизели с высокой степенью вероятности будут иметь  $P_{ц}$  в диапазоне 80–200 кВт/цил, при этом большинство дизелей из рассматриваемой выборки вероятно будут иметь  $P_{ц}$  до 135 кВт/цил. На основе приведенных исследований в качестве наиболее приемлемого принята  $P_{ц} = 140$  кВт/цил.

Выбор  $n$  и  $p_{me}$  осуществлялся на основе анализа закономерностей изменения указанных параметров для 121 современного высокооборотного дизеля (рис. 4). Исследования показали, что для рассматриваемого класса судовых дизелей при  $n = 1800$  об/мин  $p_{me}$  изменяется от 11,5 до 23 бар; при  $n = 2100$  об/мин  $p_{me}$  изменяется от 15 до 27 бар; при  $n = 2300$  об/мин  $p_{me}$  изменяется в пределах 17–29 бар. В дальнейшем исследовался диа-

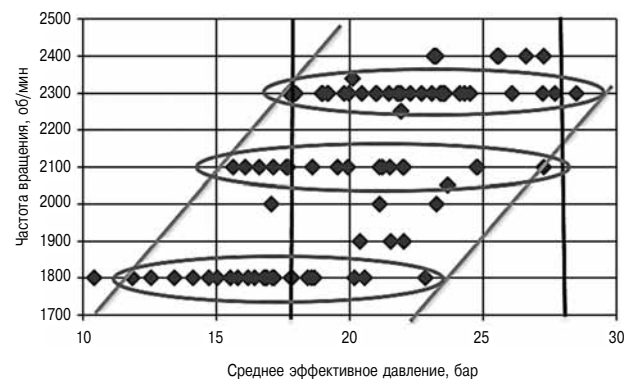


Рис. 4. Статистическая зависимость  $n$  от  $p_{me}$  для высокооборотных судовых дизелей

Варианты конструктивного исполнения дизеля

Параметр	№ Вариант																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
$P_{ц}$	140																	
$n$	2300									2100								
$p_e$	18,0			23,0			28,0			16,0			21,0			26,0		
$c_m$	11	12	13	11	12	13	11	12	13	11	12	13	11	12	13	11	12	13
$d$	19,0	18,5	17,5	17,0	16,0	15,5	15,5	14,5	14,5	14,5	20,5	19,5	18,5	18,0	17,0	16,0	16,0	15,0
$s$	14,5	15,5	17,0	14,5	15,5	17,0	14,5	15,5	17,0	15,5	17,5	18,5	15,5	17,5	18,5	15,5	17,5	18,5
$s/d$	0,76	0,84	0,97	0,85	0,97	1,09	0,94	1,07	1,17	0,76	0,90	1,0	0,86	1,03	1,15	0,97	1,16	1,28
$N_n$										50								
$m_{уд}$										2,00								

Таблица 1 дувочного воздуха принималась равной 320 К; локальный коэффициент избытка воздуха поддерживался на уровне, соответствующем  $T_z < 1900$  К для всех расчетных вариантов путем изменения давления наддува; эффективность

пазон  $p_{me}$  от 18 до 28 бар и характерные в этом случае значения  $n$ , равные 2100 и 2300 об/мин.

Для проверки работоспособности предложенной методики выполнены исследования по оценке технического облика возможных вариантов конструкции вновь создаваемых судовых высокооборотных дизелей с выбранными значениями целевых показателей проектирования:  $P_{ц} = 140$  кВт/цикл при  $n = 2300$  об/мин;  $p_{me} = 18, 23, 28$  бар;  $c_m = 11, 12, 13$  м/с и  $P_{ц} = 140$  кВт/цикл при  $n = 2100$  об/мин;  $p_{me} = 16, 21, 26$  бар;  $c_m = 11, 12, 13$  м/с. Целевые показатели выбраны с учетом рассмотренных ограничений по конструктивным и эксплуатационным показателям. На основе общеизвестных зависимостей было синтезировано 18 вариантов конструкции, с показателями, представленными в табл. 1.

С учетом ограничения по  $d/s$  к дальнейшему рассмотрению приняты варианты  $d/s = 14,5/17$  см;  $d/s = 16/18,5$  см;  $d/s = 15/17,5$  см.

Значение  $m_{уд}$  оценивалось на основании статистических данных значений  $m_{уд}$  функции от литровой мощности  $P_L$  (рис. 5).

Расчет показателей дизеля для принятых к рассмотрению вариантов выполнен с использованием упрощенного расчета рабочего цикла по методу Гриневецкого–Мазинга и программы DVS-2.1, использующейся в учебном процессе ГУМРФ

им. адм. С.О. Макарова. Такой прием допустим на ранних стадиях проектирования.

При расчетах для каждого из вариантов принимались следующие исходные данные: рассчитывался дизель с одним турбокомпрессором и охладителем воздуха, при этом температура над-

рабочего цикла оценивалась при помощи коэффициентов использования теплоты в точке «z»  $\xi_z = 0,88$  и в целом за цикл  $\xi = 0,92$ ; механический КПД дизеля принимался равным  $\eta_{мех} = 90\%$ ;

Пример результатов расчета по одной из выбранных размерностей приведен в табл. 2 с указанием оптимальных значений  $p_{max}$  и  $\epsilon$ , выбранных с учетом принятых конструктивных и эксплуатационных ограничений.

Руководствуясь ранее рассмотренными принципами экспертных оценок к окончательному рас-

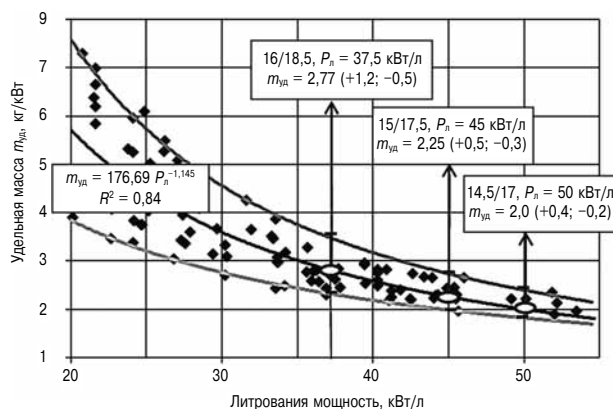


Рис. 5. Статистическая зависимость  $m_{уд} = f(P_L)$

Таблица 2

Изменение параметров дизеля в зависимости от принятых ограничений

Параметр	$N_n = 140$ кВт, $n = 2100$ об/мин, $c_m = 13$ м/с, $d = 16,0$ см, $s = 18,5$ см, $p_e = 21,5$ бар								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$T_{max}$ , К	<1900								
$\xi_z / \xi$	0,88/0,92								
$T_{int}$ , К	320								
$h_{мех}$	0,9								
$p_{max}$ , МПа	15			19			23		
$\epsilon$	12	14	16	12	14	16	12	14	16
$\lambda$	1,23	1,07	0,88	1,61	1,34	1,13	1,87	1,57	1,34
$p_{int}$ , кПа	3,85	3,84	3,87	4,00	3,93	3,90	4,17	4,05	3,96
$A$	2,1	2,08	2,07	2,27	2,24	2,22	2,43	2,39	2,35
$T_g$ , К	796	795	794	757	755	753	735	730	725
$b$ , г/кВт·ч	212	211	212	203	199	198	198	194	191

Таблица 3

Варианты конструкции, принятые для дальнейшего исследования

V-образный 12-цилиндровый высокооборотный дизель в судовом исполнении номинальной мощностью 1680 кВт ( $P_n = 140$ кВт/цил)	
1	$n = 2300$ об/мин, $c_m = 13$ м/с, $p_{me} = 28,5$ бар, $d = 14,5$ см, $s = 17,0$ см, $s/d = 1,17$ ; $\alpha = 2,33$ ; $\epsilon = 14$ ; $\lambda = 1,30$ ; $p_{max} = 23$ МПа; $p_{int} = 0,497$ МПа; $T_{max} = 1825$ К, $T_g = 740$ К, $b = 199$ г/кВт·ч; $m_{уд} = 2,0$
2	$n = 2100$ об/мин, $c_m = 13$ м/с, $p_{me} = 21,5$ бар, $d = 16,0$ см, $s = 18,5$ см, $s/d = 1,15$ ; $\alpha = 2,10$ ; $\epsilon = 12$ ; $\lambda = 1,23$ ; $p_{max} = 15$ МПа; $p_{int} = 0,385$ МПа; $T_{max} = 1830$ К, $T_g = 796$ К, $b = 212$ г/кВт·ч; $m_{уд} = 2,8$
3	$n = 2100$ об/мин, $c_m = 13$ м/с, $p_{me} = 25,8$ бар, $d = 15,0$ см, $s = 17,5$ см, $s/d = 1,16$ ; $\alpha = 2,14$ ; $\epsilon = 14$ ; $\lambda = 1,22$ ; $p_{max} = 19$ МПа; $p_{int} = 0,460$ МПа; $T_{max} = 1825$ К, $T_g = 784$ К, $b = 208$ г/кВт·ч; $m_{уд} = 2,25$

смотрению приняты варианты, параметры которых представлены в табл. 3.

Дальнейшая оценка наиболее приемлемого технического решения проводилась с учетом статистических данных по существующим высокооборотным двигателям и с использованием зависимостей (1) и (2).

Результаты статистического анализа и прогнозные оценки изменения

основных эффективных показателей для проектируемого судового дизеля представлены на рис. 6, а–г.

Используя предлагаемую методику, имеющиеся статистические данные и результаты опроса экспертов определен комплексный показатель качества  $D_i$  для каждой рассматриваемой конструкции (табл. 4).

**Выводы**

Проведенные исследования свидетельствуют о применимости функции желательности для оценки технического облика создаваемого дизеля.

Применение разработанной методики в совокупности с данными статистического анализа параметров современных судовых высокооборотных дизелей и метода экспертных

Таблица 4

Варианты конструктивного исполнения дизеля

Вариант	Кол-ные признаки					Качественные признаки							DΣ
	Эксплуатационные					Производственные							
	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>	d <sub>7</sub>	d <sub>8</sub>	d <sub>9</sub>	d <sub>10</sub>	d <sub>11</sub>	d <sub>12</sub>	
ЧН14,5/17	0,95	0,90	0,88	0,9	0,83	0,47	0,76	0,69	0,69	0,47	0,60	0,78	0,74
ЧН16/18,5	0,45	0,60	0,46	0,69	0,76	0,9	0,95	0,9	0,9	0,9	0,70	0,72	0,71
ЧН15/17,5	0,84	0,82	0,73	0,87	0,83	0,76	0,87	0,83	0,83	0,76	0,76	0,81	<b>0,82</b>

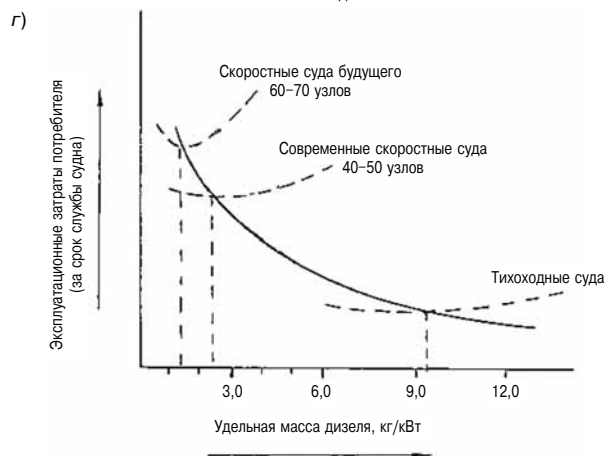
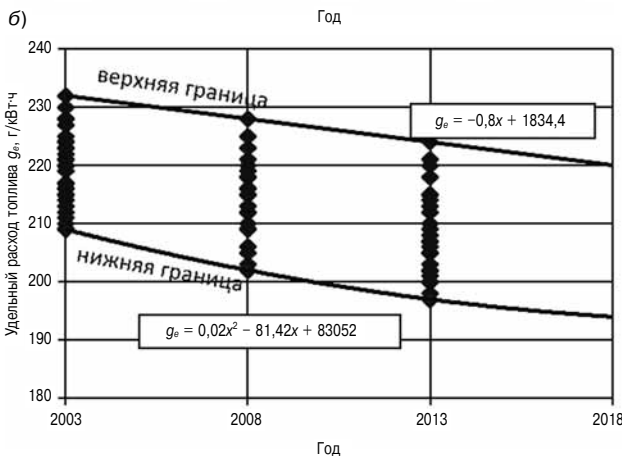
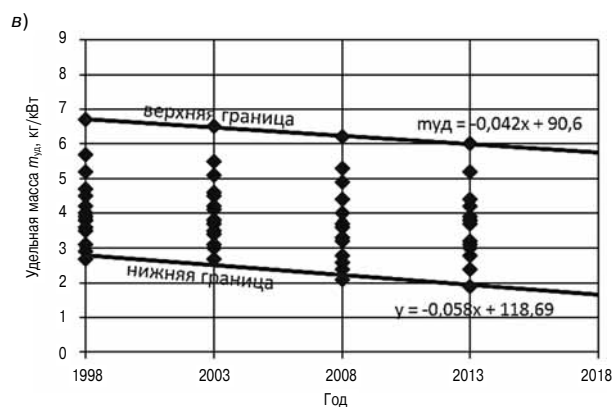
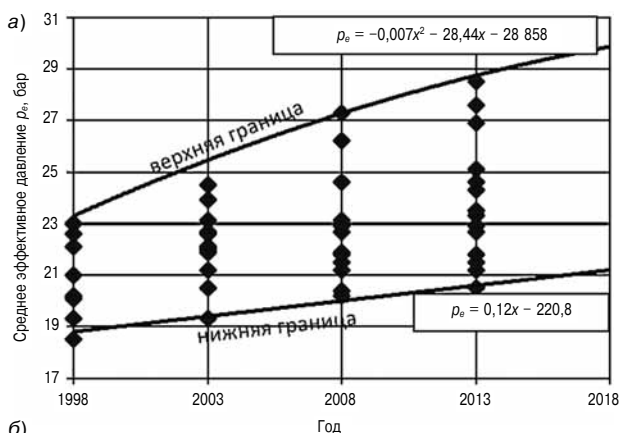


Рис. 6. Статистические данные и прогнозные оценки границ изменения эффективных показателей проектируемого судового дизеля

оценок позволяет принять оптимальное и обоснованное решение при определении технического облика вновь создаваемого судового дизеля.

#### Литература

1. Конструирование двигателей внутреннего сгорания: Учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности «Двигатели внутреннего сгорания» направления подготовки «Энергомашиностроение» / Н.Д. Чайнов, Н.А. Иващенко, А.Н. Краснокутский, Л.Л. Мягков; под ред. Н.Д. Чайнова. — М.: Машиностроение, 2008. — 496 с., ил.
2. Луканин В.Н., Алексеев И.В., Шатров М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. — М.: Высшая школа, — 2010.
3. Иванченко А.А., Боровикова И.А., Резниченко В.И. Основы проектирования нестандартных судовых энергетических установок: учебное пособие. — СПб.: СПГУВК, — 2010.
4. Исерлис Ю.Э. Мирошников В.В. Системное проектирование двигателей внутреннего сгорания. — Л.: Машиностроение. — 1981.

5. Авдевин Д.Е. Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах: автореф. ... канд. техн. наук. — СПб.: 2003.
6. Бухалков М.И. Организация производства на предприятиях машиностроения: учебник. — М.: ИНФРА-М, — 2010.
7. Гаврилов В.В. Судовое главное энергетическое оборудование. Судовые двигатели внутреннего сгорания: учеб. пособие. — СПб.: СПГУВК, 2011.
8. Марков, В.А., Баитров, Р.М., Габитов, И.И. «Токсичность отработавших газов дизелей». Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. — 2-е изд. — 2002.
9. Теория прогнозирования и принятия решений / С.А. Саркисян, В.И. Каспин, В.А. Лисичкин и др.; под ред С.А. Саркисяна. — М.: Высшая школа, 1977.
10. Сборник докладов CIMAC — 1995, Melbourne. — 1995.
11. Сборник докладов CIMAC — 2010. Bergen Доклад № 248 «Development Strategies for High Speed Marine Diesel Engines». — 2010.
12. Diesel & Gas Turbine publication. Каталоги 1998, 2003, 2008, 2013.

#### НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

### СОВЕЩАНИЕ С РУКОВОДИТЕЛЯМИ ПРЕДПРИЯТИЙ-ПОСТАВЩИКОВ КОЛОМЕНСКОГО ЗАВОДА

Генеральный директор ОАО «Коломенский завод» Н.П. Симонов в ноябре 2014 г. провел совещание с руководителями сорока организаций-поставщиков комплектующих изделий для конечной продукции завода (дизели и тепловозы) по вопросам импортозамещения и развития кооперации в 2015 г. В своем выступлении он подчеркнул, что решающим аргументом для Коломенского завода при выборе поставщиков является качество комплектующих изделий и способность выполнять поставки в установленные договорными сроки.

ОАО «Коломенский завод» уже частично диверсифицировал поставки и в настоящее время получает некоторые комплектующие не из стран Западной Европы и Украины, а из Южной Кореи и Индии, а также непосредственно из России.

Так, ОАО РЖД приняло решение о начале серийного выпуска на Брянском машиностроительном заводе (БМЗ) нового грузового тепловоза 2ТЭ25К «Пересвет» взамен 2ТЭ116 производимого в Луганске (Украина).

Дизель-генераторы «Коломенского завода» 18-9ДГ, ранее поставляемые в Луганск, в настоящее время адаптированы для тепловозов 2ТЭ25К «Пересвет». Руководство «Коломенского завода» считает, что все участники организации нового производства, в том числе — КЗ и его

поставщики, обязаны поддерживать БМЗ ответственным исполнением своих обязательств.

Серьезной задачей, как для Коломенского завода, так и для его поставщиков, станет в 2015 г. остановка на производство дизель-генераторов нового поколения на базе дизелей новой размерности Д500 и Д300 при проектировании которых предполагалась возможность развития кооперации с поставщиками из стран Западной Европы.

При обсуждении развития производственной программы завода поставщики были информированы о требованиях ОАО РЖД к качеству локомотивной и дизельной продукции о недопустимости повторяющихся дефектов.

В заключение представители дирекции ОАО «Коломенский завод» вручили руководителям одиннадцати предприятий Сертификаты добросовестного поставщика, в котором, в частности, сказано: «Ваше предприятие является надежным поставщиком качественной продукции для "Коломенского завода". Вместе мы развиваем отрасль тяжелого транспортного машиностроения России. Надеемся, что наши партнерские связи в будущем будут только укрепляться, а взаимовыгодное сотрудничество принесет пользу, как нашим предприятиям, так и потребителям».

<http://www.kolomnadiesel.com>