

УДК 629.12.03-843.6

## Исследование достоверности определения эффективной мощности главных судовых ДВС различными методами

**В.А. Амахин**

*Мурманская судоверфь*

**Аннотация.** В статье рассмотрена достоверность определения эффективной мощности судовых двигателей внутреннего сгорания по расходу топлива, по среднему индикаторному давлению в цилиндрах, по среднему во времени давлению в цилиндрах, по частоте вращения ротора турбокомпрессора, по давлению наддувочного воздуха после охладителя, по максимальному давлению сгорания, по температуре выпускных газов на выходе из цилиндров, по углу поворота лопастей винта регулируемого шага и вероятностно-статистическим методом по эталонному комплексу.

**Abstract.** The paper considers reliability of effective power estimation of main ship engines of internal combustion by various methods. They are as follows: fuel consumption, average display pressure in cylinders, average pressure in cylinders according to time, frequency of the compressor rotor rotation, pressure of supercharging air after a cooler, the maximal pressure of combustion, temperatures of final gases on the cylinders' output, a corner of the screw blades turn of an adjustable step and a statistical method of the standard complex.

### 1. Введение

Приемо-сдаточные испытания главных дизельных установок (ГДУ) судов проводятся в разных климатических и погодных условиях в течение всего года на акваториях с различными глубинами, размерами, наличием течений, приливов и отливов, которые влияют на оптимальные условия проведения испытаний и могут привести к изменению режимов работы гребного винта и кинематически связанного с ним главного двигателя (ГД) судна.

Первостепенную важность для флота, судостроительной и судоремонтной отраслей промышленности имеет задача достоверного определения эффективной мощности  $P_e$  главных судовых двигателей внутреннего сгорания (ДВС), так как правильное задание  $P_e$  определяет качество регулировочно-наладочных работ главных судовых ДВС, от которых зависят эксплуатационная надежность и экономические показатели работы двигателей. При этом достоверность определения  $P_e$  главных ДВС судов с винтами регулируемого шага (ВРШ) известными методами с помощью штатных средств измерений теплотехнических параметров часто не удовлетворяет требованиям действующей нормативно-технической документации. Вследствие этого на судоремонтных и судостроительных предприятиях (верфях) в процессе приемо-сдаточных испытаний главных дизельных установок (ГДУ) судов с ВРШ нередко возникали спорные ситуации, когда представители судовладельца полагали, что главные судовые ДВС не развивают спецификационной мощности, а представители промышленности наоборот утверждали, что двигатели работают с перегрузкой. Отсутствие универсального достоверного метода определения  $P_e$  главных судовых ДВС приводило к тому, что такие спорные ситуации разрешались только в процессе ходовых испытаний судна на мерной миле.

По этой причине до конца 80-х годов не имел широкого применения имитационный метод испытаний ГДУ судов с ВРШ потому, что достоверность нагружения главных двигателей (ГД) при испытаниях ГДУ судов с ВРШ имитационным методом не удовлетворяла требованиям Морского Регистра Судоходства РФ и судовладельцев.

Отклонения  $P_e$  главных двигателей на режимах испытаний главных судовых энергетических установок (ГСЭУ) должны удовлетворять ГОСТ 21792-76 "Установки дизельные судовые. Правила приемки и методы приемосдаточных испытаний на судне". При использовании имитационных методов испытаний ГСЭУ в ходовых режимах на швартовах отклонение мощности на промежуточных режимах должно быть  $\pm 5\%$ , а на режимах номинальной и максимальной мощности до  $5\%$ .

Проблеме определения  $P_e$  судовых ДВС посвящены работы Ваншейдта В.А., Возницкого И.В. (*Возницкий и др.*, 1975), Гордеева П.А., Захаренко Б.А., Коптева К.Н., Магнитского Ю.А., Овсянникова М.К. (*Овсянников, Петухов*, 1987), Олейникова Б.И. (1986), Петровского Н.В. (1956), Шишкина В.Г. и другие.

Известные методы определения  $P_e$  судовых ДВС имеют ограниченное применение в эксплуатации из-за отсутствия на многих ГД судов специальных штатных средств измерений крутящего

момента, среднего индикаторного давления, расхода топлива и других параметров. Большинство главных судовых двигателей, работающих в составе прямой передачи мощности или через редуктор на гребной винт судна, не имеют специальных средств измерения крутящего момента на валу гребного винта (открытого или в насадке).

Задачей исследований, проведенных автором, являлось изучение и сравнение достоверности определения эффективной мощности главных ДВС рыболовных траулеров, работающих в составе прямой или через редуктор передачи мощности на гребной винт судна, различными методами.

## 2. Анализ достоверности определения $Pe$ главных судовых ДВС различными методами

Автором разработан универсальный вероятностно-статистический метод определения  $Pe$  ДВС (Амахин, 1993), позволяющий провести анализ достоверности определения  $Pe$  главных судовых ДВС другими известными методами.

### Влияние вариаций опытных распределений значений на достоверность определения $Pe$ ДВС по расходу топлива

В настоящее время  $Pe$  некоторых типов главных судовых ДВС определяют по расходу топлива  $G_f$  объемным методом с помощью штатных мерных бачков (Ваншейдт и др., 1978) или по положению регулирующей рейки  $m_T$  топливных насосов высокого давления (ТНВД), которое косвенно характеризует расход топлива двигателем (Фомин, 1985).

Необходимо отметить, что в составе многих главных судовых ДВС, находящихся в эксплуатации судов, штатные мерные бачки не предусмотрены, например, 8ЧН 40/48 (8ZL 40/48) БМРТ типа "Иван Бочков". На остальных судах процесс определения расхода топлива мерными бачками не автоматизирован, и данные измерений не выносятся в центральный пост управления (ЦПУ) машинного отделения, что делает невозможным оперативный контроль  $Pe$  ГД. При этом для проведения измерений расхода топлива ГД требуется привлечение одного-двух человек из состава машинной команды судна, которая в современных условиях и без того трудится очень интенсивно. Значительно проще контролировать  $Pe$  ГД по положению регулирующей рейки ТНВД. В этом случае процесс измерений легче автоматизировать и данные измерений можно вынести в ЦПУ машинного отделения судна. Например, это предусмотрено в конструкции главных двигателей 8ЧН 20/26 рыболовных траулеров проекта "Атлантик 333".

Сравним достоверность определения  $Pe$  по  $G_f$  и  $m_T$  двух групп двигателей 6ЧН 25/30 и 6ЧН 24/31. Воспользуемся универсальным методом определения  $Pe$  ДВС (Амахин, 1993). При этом  $Pe$  двигателей будем определять по одному из рассматриваемых параметров  $Pe = \varphi(x_{an})$ , где  $x_{an} = G_f$  или  $m_T$ . Рассчитаем относительные ошибки определения  $Pe$  по каждому из рассматриваемых параметров по данным стендовых испытаний для каждой из двух групп новых однотипных двигателей 6 ЧН 25/30 и 6 ЧН 24/31 на всех основных режимах нагрузки.

Для каждого из параметров по известным математическим зависимостям определим среднюю величину  $\bar{x}_{an}$ , дисперсию  $\sigma_{x_{an}}$ , значение доверительной случайной погрешности  $\varepsilon_{x_{an}}(P)$ , коэффициент вариации  $V_{an}$ , коэффициент линеаризации функции  $v_{an}$  (Амахин, 1993).

Относительные ошибки определения  $Pe$  двигателей вычислим по формуле:

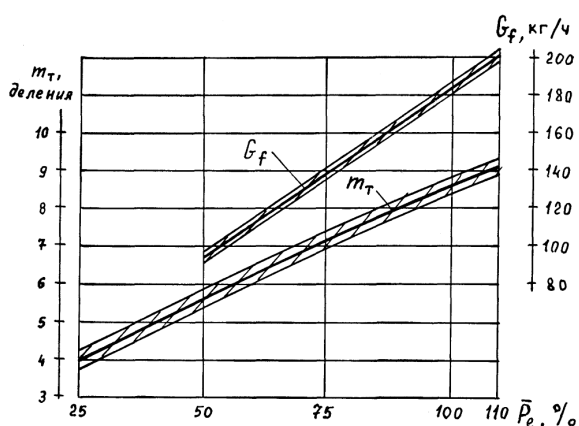


Рис. 1. Эталонные значения основных теплотехнических параметров  $G_f$  или  $m_T$  для контроля эффективной мощности двигателя 6ЧН 25/30

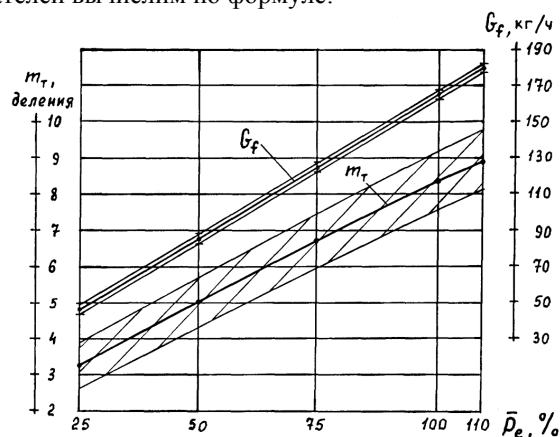


Рис. 2. Эталонные значения основных теплотехнических параметров  $G_f$  или  $m_T$  для контроля эффективной мощности двигателя 6ЧН 23/31

$$\delta Pe = \pm t_a \times V_{an} \times v_{an} \times 100, \% \quad (1)$$

где  $t_a$  – коэффициент Стьюдента.

Данные вычислений сведены в табл. 1.

На рис. 1 и 2 представлены эталоны для контроля  $Pe$  двигателей 6 ЧН 25/30 и 6 ЧН 24/31 по  $G_f$  и  $m_T$ . Из табл. 1 следует, что достоверность определения  $Pe$  двигателей по  $G_f$  в несколько раз выше, чем по  $m_T$ . Необходимо отметить, что для разных типов ДВС достоверность определения  $Pe$  одним и тем же методом может существенно различаться.

Достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по расходу топлива объемным методом штатными мерными бачками удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89 и в несколько раз выше, чем по положению регулирующей рейки ТНВД. Достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по положению регулирующей рейки ТНВД редко удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89, что ограничивает возможность использования этого метода. Однако для оперативного определения эффективной мощности главных судовых ДВС по расходу топлива с помощью штатных мерных бачков требуется автоматизировать процесс измерений, так как иначе пользоваться этим методом на практике сложно и во многих случаях нецелесообразно.

Таблица 1

Параметр	$Pe, \%$	Расчетные значения					
		$\bar{x}_{a_n}, \text{ кг/ч}$	$\sigma_{\text{Хан}}, \text{ кг/ч}$	$\varepsilon_{\text{Хан}}(P), \text{ кг/ч}$	$V_{an}$	$v_{an}$	$\delta Pe, \%$
Для двигателей 6 ЧН 25/30							
$G_f$ кг/ч	50	93,31	0,5971	$\pm 1,3555$	0,0064	1,0201	$\pm 1,5$
	75	137,94	0,8618	$\pm 1,1952$	0,0062	1,0254	$\pm 1,5$
	100	182,10	0,3521	$\pm 0,7184$	0,0019	0,9680	$\pm 0,4$
	110	203,78	1,1341	$\pm 2,5744$	0,0056	0,8399	$\pm 1,1$
$m_T$ деления	25	3,94	0,1430	$\pm 0,3246$	0,0363	1,0317	$\pm 8,5$
	50	5,54	0,0966	$+ 0,2193$	0,0174	1,4004	$\pm 5,5$
	75	6,99	0,1449	$\pm 0,3290$	0,0207	1,4226	$\pm 6,7$
	100	8,54	0,1435	$\pm 0,2927$	0,0168	1,4374	$\pm 4,9$
	110	9,07	0,1829	$+ 0,4151$	0,0202	1,6194	$\pm 7,4$
Для двигателей 6 ЧН 24/31							
$G_f$ кг/ч	25	45,971	0,5486	$\pm 1,2452$	0,0119	1,0606	$\pm 3,5$
	50	84,548	1,3266	$\pm 3,0114$	0,0157	1,0640	$\pm 3,8$
	75	122,882	1,1325	$\pm 2,5708$	0,0092	1,0343	$\pm 2,2$
	100	163,663	0,8256	$\pm 1,4044$	0,0050	0,9613	$\pm 1,1$
	110	182,470	0,7953	$\pm 1,8053$	0,0044	0,8702	$\pm 0,9$
$m_T$ деления	25	3,27	0,2751	$\pm 0,6244$	0,0841	1,1638	$\pm 22,2$
	50	5,04	0,2797	$\pm 0,6349$	0,0555	1,2082	$\pm 15,2$
	75	6,68	0,3584	$\pm 0,8135$	0,0537	1,2875	$\pm 15,7$
	100	8,24	0,3992	$\pm 0,8343$	0,0484	1,3050	$\pm 13,2$
	110	8,89	0,4606	$\pm 1,0455$	0,0518	1,2677	$\pm 14,9$

### Влияние вариаций опытных распределений значений на достоверность определения $Pe$ ДВС по среднему индикаторному давлению в цилиндрах

$Pe$  судовых ДВС можно определять по среднему индикаторному давлению  $p_i$  в цилиндрах двигателя. ГОСТ 21 792-89 устанавливает, что погрешность определения  $Pe$  этим методом не должна превышать  $\pm 5 \%$  на режиме номинальной мощности.

В настоящее время определение эффективной мощности по  $p_i$  в цилиндрах некоторых судовых ДВС производится штатными механическими с индикаторным приводом или переносными электрическими с пьезоэлектрическими датчиками давления индикаторами, которые позволяют получать индикаторные диаграммы в координатах давление в цилиндре – угол поворота коленчатого вала двигателя.

**Рассмотрим погрешности определения  $Pe$  по  $p_i$ , определяемому штатными механическими с индикаторным приводом индикаторами.** Для примера рассмотрим главные двигатели 6ДРН 50/90 БМРТ типа "Грумант". В цилиндрах двигателей 6ДРН 50/90  $p_i$  определяется по снятым индикаторным диаграммам с помощью планиметра. Необходимо отметить, что определение  $p_i$  в цилиндрах двигателя таким способом является одним из наиболее трудоемких и продолжительных видов измерений параметров ДВС, что делает невозможным оперативный контроль  $Pe$  ГД судов.

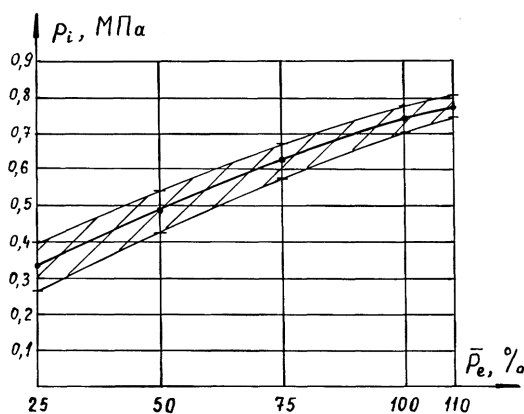


Рис. 3. Эталон значений  $p_i$  для контроля эффективной мощности двигателя 6ДРН 50/30

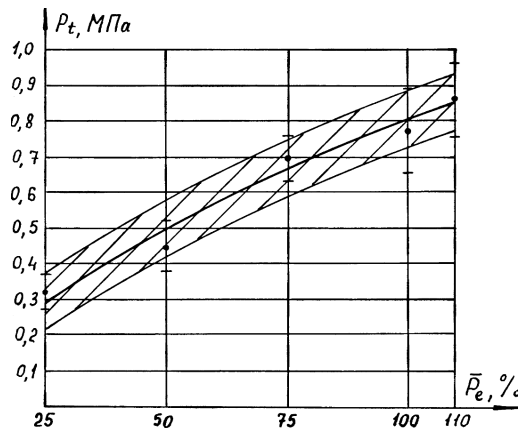


Рис. 4. Эталон значений  $p_i$  для контроля эффективной мощности двигателя 6ЧРН 52.5/72

Таблица 2

$Pe, \%$	Расчетные значения					
	$\bar{x}_{an}, \text{МПа}$	$\sigma_{Xan}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{Xan}(P), \text{МПа}$	$V_{an}$	$v_{an}$	$\delta Pe, \%$
25	0,3429	0,0305	$\pm 0,0732$	0,0890	0,9410	$\pm 20,1$
50	0,4670	0,0272	$\pm 0,0598$	0,0582	1,0931	$\pm 14,0$
75	0,06320	0,0213	$\pm 0,0468$	0,0336	1,3291	$\pm 9,8$
100	0,7486	0,0175	$\pm 0,0357$	0,0233	1,7653	$\pm 8,4$
110	0,7883	0,0129	$+ 0,0283$	0,0163	1,9848	$\pm 7,1$

Определение погрешности измерения  $Pe$  по  $p_i$  произведём аналогично вышеизложенному.

Данные вычислений сведены в табл. 2.

На рис. 3 представлен эталон для контроля  $Pe$  двигателя 6ДРН 50/90 по  $p_i$ .

Из табл. 2 следует, что погрешность определения  $Pe$  двигателя 6ДРН 50/90 по  $p_i$ , измеряемому штатными механическими с индикаторным приводом индикаторами, не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21 792-89.

В случае отсутствия индикаторного привода на механический индикатор, например, как у широко используемого в измерениях судовых ДВС переносного немецкого механического поршневого индикатора типа 30 (50) с наружной пружиной, достоверность определения  $Pe$  по  $p_i$  будет еще меньше, так как при этом невозможно обеспечить строгую зависимость давления в цилиндре, подверженного цикловым изменениям, от угла поворота коленчатого вала двигателя.

**Рассмотрим погрешности определения  $Pe$  по  $p_i$  в цилиндрах ДВС, оборудованных индикаторным кранами, измеряемому электрическим индикатором с пьезоэлектрическими датчиками давления.** В случае отсутствия статистических данных измерений  $p_i$  в процессе стендовых испытаний новых двигателей  $Pe$  ДВС в эксплуатации на всех основных режимах нагрузки можно определить по формуле (Ваншейдт, 1978):

$$Pe = 1,634 i_d z V_s n_d \eta_m, \text{ кВт}, \quad (2)$$

где  $i_d$  – число цилиндров,  $z$  – коэффициент тактности ( $z = 0,5$  для четырехтактных и  $z = 1$  для двухтактных двигателей),  $V_s$  – рабочий объем цилиндра,  $\text{м}^3$ ,  $n_d$  – частота вращения коленчатого вала, об/мин,  $\eta_m$  – механический коэффициент полезного действия.

Наибольшее распространение при испытаниях главных двигателей судов в настоящее время получили переносные электроизмерительные комплексы типа NK с датчиками давления GT-20 норвежской фирмы Autronica. Эти комплексы отличает высокая оперативность измерений  $p_i$ , так как в их составе имеется ЭВМ. Данные измерений выводятся на дисплей и могут быть распечатаны (Кааре Ааен, 1989).

Параметры  $V_s, n_d, p_i, \eta_m$  на каждом режиме нагрузки имеют определенные погрешности, которые зависят от погрешностей средств измерений, конструктивных особенностей, технологии изготовления и сборки, параметров рабочего процесса в цилиндрах двигателя (Грин, Орехов, 1987; Карминский, Магнитский, 1979).

Достоверность определения  $Pe$  по  $p_i$  в цилиндрах ДВС зависит от конструктивных особенностей средств измерений  $p_i$  и условий их применения. С целью повышения достоверности определение  $Pe$  целесообразно производить по эталону, составленному по данным измерений  $p_i$  в цилиндрах в процессе

испытаний представительной группы новых однопоршневых ДВС. В случае отсутствия таких данных необходимо учитывать погрешности совокупного числа параметров, что снижает достоверность определения  $Pe$  по  $p_i$  в цилиндрах двигателя.

**Влияние вариаций опытных распределений значений на достоверность определения  $Pe$  ДВС по среднему во времени давлению в цилиндрах**

В настоящее время  $Pe$  некоторых ДВС определяют с помощью штатного пиметра по среднему во времени давлению в цилиндрах  $p_i$  (Ваншейдт и др., 1978).

Рассмотрим погрешности определения  $Pe$  по  $p_i$  на примере главного двигателя 6ЧРН 52,5/72 рыболовных траулеров проекта 1386. В цилиндрах двигателя 6ЧРН 52,5/72  $p_i$  определяется с помощью штатного пиметра.

Определение погрешности измерения  $Pe$  по  $p_i$  произведём аналогично вышеизложенному.

Данные вычислений сведены в табл. 3.

На рис. 4 представлен эталон для контроля  $Pe$  этого двигателя по  $p_i$ .

Из табл. 3 следует, что погрешность определения  $Pe$  двигателями 6ЧРН 52,5/72 по  $p_i$  не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89. Таким образом, на практике пиметрами целесообразно пользоваться только при контроле распределения нагрузки по цилиндрам ДВС, так как в этом случае можно ориентироваться на относительные отклонения измеряемой величины  $p_i$  от среднего значения, которое при этом строго не регламентируется.

Таблица 3

$Pe, \%$	Расчетные значения					
	$\bar{x}_{a_n}, \text{ МПа}$	$\sigma_{x_{an}}, \text{ МПа}$	$\varepsilon_{x_{an}}(P), \text{ МПа}$	$V_{an}$	$v_{an}$	$\delta Pe, \%$
25	0,3213	0,0243	0,0491	0,0757	1,5195	$\pm 23,2$
50	0,4480	0,0352	0,0711	0,0786	1,4261	$\pm 22,6$
75	0,5931	0,0316	0,0638	0,0533	1,1954	$\pm 12,9$
100	0,7701	0,0585	0,1182	0,0760	1,0087	$\pm 15,5$
110	0,8603	0,0522	0,1054	0,0607	0,8538	$\pm 10,5$

**Влияние вариаций опытных распределений значений на достоверность определения  $Pe$  ДВС по углу поворота лопастей  $\alpha_n$  ВРШ**

В процессе швартовых или ходовых испытаний ГДУ судов с механической передачей мощности на ВРШ необходимо достоверно задавать загрузку ГД на основных режимах испытаний, предусмотренных ГОСТ 21792-89. ВРШ обладают универсальной нагрузочной способностью и обеспечивают воспроизведение нагрузочной или винтовой характеристики ГД в зависимости от конструктивных особенностей ГДУ при любых условиях. По нагрузочной характеристике (при постоянной частоте вращения коленчатого вала) работают ГД в составе дизель-редукторных агрегатов (ДРА) с валогенераторами. По винтовой характеристике (при переменной частоте вращения коленчатого вала) работают ГД в составе ГДУ с прямой передачей мощности на ВРШ. В этом случае понятие "винтовая характеристика ГД" – условное, так как она обеспечивается одновременным заданием частоты вращения коленчатого вала, которая увеличивается с ростом нагрузки, и  $\alpha_n$  ВРШ. Частота вращения коленчатого вала  $n_d$  для каждого основного режима нагрузки ГД всегда постоянна. При этом  $\alpha_n$  ВРШ в зависимости от скорости натекания потока воды на гребной винт (при отсутствии течений на акваториях, где производятся швартовые и ходовые испытания ГДУ или косога натекания потока на движитель при маневрировании судна на ходу) на швартовых и ходовых испытаниях будут отличаться при одинаковой нагрузке ГД на идентичных режимах.

Рассмотрим влияние случайных погрешностей на достоверность определения загрузки главного двигателя 8ЧРН 40/48 БМРТ проекта В-408 (типа "Иван

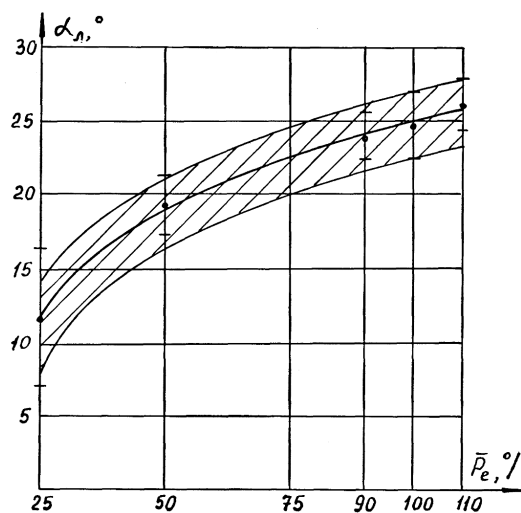


Рис. 5. Эталон для контроля эффективной мощности двигателя 8ЧРН 40/48 БМРТ проекта В-408 по углу поворота лопастей  $\alpha_n$  ВРШ на ходовых испытаниях

Бочков") по  $\alpha_i$  ВРШ на идентичных режимах ходовых испытаний представительной группы ГДУ.

Определение погрешности измерения  $Pe$  по  $\alpha_i$  ВРШ произведём аналогично вышеизложенному.

Данные вычислений сведены в табл. 4.

На рис. 5 представлен эталон для контроля  $Pe$  двигателя 8ЧРН 40/48 по  $\alpha_i$  ВРШ.

Из табл. 4 следует, что погрешность определения  $Pe$  главного двигателя 8ЧРН 40/48 БМРТ проекта В-408 по  $\alpha_i$  ВРШ не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21 792-89.

Необходимо также учитывать и то обстоятельство, что при наличии течений на акватории, где проходят швартовные или ходовые испытания ГДУ, а также при маневрировании судна на ходу достоверность определения загрузки по  $\alpha_i$  ВРШ будет еще меньше. Таким образом,  $\alpha_i$  ВРШ может служить только справочной величиной при определении загрузки ГД.

Таблица 4

$Pe, \%$	Расчетные значения					
	$\bar{x}_{\alpha_n}, \text{МПа}$	$\sigma_{x_{\alpha_n}}, \text{МПа}$	$\varepsilon_{x_{\alpha_n}}(P), \text{МПа}$	$V_{\alpha_n}$	$v_{\alpha_n}$	$\delta Pe, \%$
25	11,7263	2,1911	+ 4,6013	0,1869	0,8137	+ 31,9
50	19,3053	0,9658	+ 2,0282	0,0500	1,2951	+ 13,6
90	24,1063	0,6361	+ 1,3613	0,0264	2,3004	+ 13,0
100	24,6666	1,1350	+ 2,2701	0,0460	2,1707	+ 20,0
110	26,3789	0,8489	+ 1,7827	0,0322	1,4406	$\pm 9,7$

**Влияние вариаций опытных распределений значений частоты вращения ротора турбокомпрессора  $n_T$ , давления наддувочного воздуха после охладителя  $p_{int}$  максимального давления сгорания  $p_{max}$  и температуры выпускных газов на выходе из цилиндров  $t_g$  на достоверность определения  $Pe$  ДВС наиболее часто используемыми на судах методами**

Рассмотрим погрешности определения  $Pe$  наиболее часто используемыми на морских судах методами по  $t_g$  и  $n_d$ , по  $p_{int}$  и  $n_d$ , по  $n_T$  и  $n_d$  и по  $p_{max}$  и  $n_d$  на примере группы главных двигателей 6ЧРН 52,5/72 рыболовных траулеров проекта 1386, работающих в составе передачи мощности через главный редуктор на ВРШ.

Определение погрешности измерения  $Pe$  по  $t_g$  и  $n_d$ , по  $p_{int}$  и  $n_d$ , по  $n_T$  и  $n_d$  и по  $p_{max}$  и  $n_d$  произведём аналогично вышеизложенному.

Данные вычислений сведены в табл. 5.

Таблица 5

$Pe, \%$	$\delta Pe, \%$					
	по $t_g$ и $n_d$	по $p_{int}$ и $n_d$	по $n_T$ и $n_d$	по $p_{max}$ и $n_d$	по $G_f$ и $n_d$	вероятностно-статистическим методом
25	$\pm 10,8$	$\pm 72,5$	$\pm 15,0$	$\pm 10,8$	$\pm 7,1$	$\pm 6,2$
50	$\pm 16,5$	$\pm 23,8$	$\pm 10,3$	$\pm 16,5$	$\pm 7,1$	$\pm 5,9$
90	$\pm 17,8$	$\pm 14,6$	$\pm 8,1$	$\pm 17,8$	$\pm 4,7$	$\pm 4,7$
100	$\pm 12,5$	$\pm 6,6$	$\pm 8,2$	$\pm 12,5$	$\pm 3,9$	$\pm 4,7$
110	$\pm 14,1$	$\pm 7,8$	$\pm 11,4$	$\pm 14,1$	$\pm 3,8$	$\pm 5,7$

Из табл. 5 следует, что погрешности определения  $Pe$  двигателя 6ЧРН 52,5/72 известными методами по  $t_g$  и  $n_d$ , по  $p_{int}$  и  $n_d$ , по  $n_T$  и  $n_d$  и по  $p_{max}$  и  $n_d$  не удовлетворяют требованиям ГОСТ 21 792-89.

Пользоваться этими методами на практике при определении  $Pe$  ДВС не рекомендуется.

Для сравнения в табл. 5 приведены погрешности определения  $Pe$  двигателя 6ЧРН 52,5/72 по расходу топлива  $G_f$  объемным методом с помощью штатных мерных бачков и вероятностно-статистическим методом по комплексу его основных теплотехнических параметров, находящихся в функциональной зависимости от  $Pe$  (Амахин, 1993).

Вероятностно-статистический метод дает наименьшую погрешность среди рассмотренных методов определения  $Pe$  двигателя 6ЧРН 52,5/72 на долевых режимах нагрузки, удовлетворяет требованиям ГОСТ 21 792-89 на режиме номинальной нагрузки и не зависит от технического состояния штатных мерных бачков для определения расхода топлива двигателем, которые часто выходят из строя после многих лет эксплуатации и не восстанавливаются в процессе ремонта.

### 3. Заключение

Установлено, что достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по  $G_f$  объемным методом с помощью мерных бачков удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89 и в несколько раз выше, чем по

положению рейки топливного насоса высокого давления, которая редко удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89. С целью оперативного определения  $Pe$  главных судовых ДВС по  $G_f$  с помощью штатных мерных бачков требуется автоматизировать процесс измерений.

Установлено, что достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по  $p_i$  в цилиндрах зависит от конструктивных особенностей средств измерений и условий их применения. Достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по  $p_i$  в цилиндрах, измеряемому штатными механическими с индикаторным приводом индикаторами, не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89. С целью повышения достоверности определения  $Pe$  ДВС, оборудованных индикаторными кранами, по  $p_i$  в цилиндрах, измеряемому электрическим индикатором с пьезоэлектрическими датчиками давления, целесообразно производить по эталону, составленному по данным измерений среднего индикаторного давления в процессе стендовых испытаний представительной группы новых однотипных ДВС.

Установлено, что достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС по  $p_i$  в цилиндрах не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89. Пиметрами рекомендуется пользоваться только при контроле распределения нагрузки по цилиндрам ДВС.

Установлено, что достоверность определения  $Pe$  судовых ДВС наиболее часто используемыми на судах методами (по  $t_g$  и  $n_d$ , по  $p_{int}$  и  $n_d$ , по  $n_T$  и  $n_d$  и по  $p_{max}$  и  $n_d$ ) не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89.

Установлено, что угол поворота лопастей ВРШ не может однозначно определять загрузку главных судовых ДВС с механической передачей мощности на гребной винт. При этом достоверность определения  $Pe$  главных судовых ДВС по  $\alpha_n$  ВРШ не удовлетворяет требованиям ГОСТ 21792-89.

Определение  $Pe$  главных судовых ДВС целесообразно производить универсальным вероятностно-статистическим методом по эталонному комплексу, составленному не менее чем из трех основных теплотехнических параметров, находящихся в функциональной зависимости от эффективной мощности на всех основных режимах нагружения двигателя и определяемых его штатными средствами измерений. Вероятностно-статистический метод дает наименьшую погрешность среди известных методов определения  $Pe$  главных судовых ДВС, работающих в составе прямой передачи мощности или через редуктор на гребной винт судна и применим для двигателей средней и большой мощности различных конструкций.

## Литература

- Амахин В.А. Способ определения загрузки двигателя внутреннего сгорания. А.С. 1809350 СССР. МКИ G01M15/00. Патентный бюллетень изобретений, № 14, с.173, 1993.
- Ваншейдт В.А. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Л., Судостроение, 392 с., 1978.
- Ваншейдт В.А., Гордеев П.А., Захаренко Б.А., Истомин П.А., Коптев К.Н., Чурбанов Б.М., Шишкин В.Г., Яковлев Г.В. Судовые установки с двигателями внутреннего сгорания. Л., Судостроение, 368 с., 1978.
- Возницкий И.В., Грин А.А., Пунда А.С. Влияние сорта топлива на индикаторный процесс судового малооборотного дизеля. Судовые силовые установки: Сборник научных трудов. М., Реклам-информбюро ММФ, вып. 13, с.67-71, 1975.
- Грин А.А., Орехов Ю.А. Источники погрешности систем индицирования типа МК-3. Морской транспорт. Сер. "Техническая эксплуатация флота". Экспресс-информация. М., В/О "Мортехинформ-реклама", вып. 13(657), с.7-13, 1987.
- Кааре Ааен. Контроль технического состояния судовых дизелей. Двигателестроение, № 6, с.27-29, 1989.
- Карминский В.Д., Магнитский Ю.А. Об учёте влияния индикаторного канала на точность определения внутрицилиндровых характеристик. Ростов н/Д, Труды РИИЖГ, вып. 149, с.36-51, 1979.
- Овсянников М.К., Петухов В.А. Дизели в пропульсивном комплексе морских судов. Л., Судостроение, 254 с., 1987.
- Олейников Б.И. Техническая эксплуатация дизелей судов флота рыбной промышленности. М., Агропромиздат, 269 с., 1986.
- Петровский Н.В. Теплотехнические испытания судовых двигателей внутреннего сгорания. М., Морской транспорт, 235 с., 1956.
- Фомин Ю.Я. Определение мощности среднеоборотных судовых дизелей в эксплуатации. Двигателестроение, № 4, с.48-50, 1985.