

---

---

# СУДОВЫЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ, УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ, ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СУДОВОЖДЕНИЯ, ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ СУДОВ

---

---

УДК 621.182.3:629.2-843.9

**Л.К. Капран, В.В. Маницын, З.П. Старовойтова**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГЛАВНОГО ДИЗЕЛЯ 5ДКРН50/110-2 ТАНКЕРА ТИПА «ОХАНЕФТЬ» С УМЕНЬШЕНИЕМ НОМИНАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ВИНТА 3,7 м ДО 3,54 м**

*Приводятся общие сведения танкера типа «Оханефть» и ее главной энергетической установки (главный двигатель, винт фиксированного шага с номинальным диаметром  $D = 3,7$  м и шагом  $S = 2,94$  м). Гребной винт с номинальным диаметром оказался «тяжелым» в эксплуатации, поэтому выполнена подрезка лопастей гребного винта до  $D = 3,54$  м,  $S = 2,94$  м.*

*С целью определения текущей мощности ГД в эксплуатации используется винтовая характеристика дизеля, полученная по результатам стендовых испытаний.*

*Приводятся статистические данные, полигоны распределений мощности главного дизеля, уравнения винтовой и топливных характеристик на режимах «переход» и «работа на промысле». Даются рекомендации по оптимизации мощности и расходу топлива главным дизелем в эксплуатации.*

**Ключевые слова:** *главный дизель, полигоны распределения мощности на режимах «переход» и «работа на промысле», топливные характеристики.*

## **L.K. Kapran, V.V. Manyisyn, Z.P. Starovoytova IMPROVING OPERATIONAL EFFICIENCY OF MAIN DIESEL ENGINE 5DKRN50/110-2 OF THE «OHANEFT» TANKER WITH REDUCTION OF NOMINAL DIAMETER 3,7m TO 3,54 m**

*Provides an overview of the type of tanker «Ohaneft» and its main power the installation (main engine, fixed pitch propeller with a nominal diameter  $D = 3.7$  m and a step  $S = 2,94$  m). Propeller with a nominal diameter was «heavy» in the exploitation, so pruning is made cavities propeller to  $D = 3.54$  m,  $S = 2,94$  m.*

*In order to determine the current power is used to operate the DG spiral ha tics diesel generated from the test benc .*

*Statistical data, polygons main power distributions diesel equations screw and fuel characteristics on mode «transition» and «work in the fishery». Provides recommendations for optimizing power and fuel main engines in operation.*

**Key words:** *main diesel engine, screw, fuel characteristics, specific fuel consumption.*

### **Введение**

Проблема повышения эффективности технической эксплуатации главного дизеля на судах морского и промыслового флота до настоящего времени является предметом исследований научно-исследовательских и проектных организаций и относится к весьма актуальным. Решение этой проблемы предусматривает исследования, направленные на сокращение затрат на горюче-смазочные материалы.

### Общие сведения

Танкер «Оханефть» является головным судном, построенным в 1978 г. в Финляндии. Танкер типа «Оханефть» предназначен для перевозки топлива и смазочного масла в районы промысла и снабжения им добывающего и обрабатывающего флота.

Основные характеристики судна:

Наибольшая длина, м .....	115,5.
Ширина, м .....	17.
Дедвейт, т .....	5873.
Водоизмещение полное, т.....	8913.
Скорость судна, м/с (уз).....	7,56 (14).
Экипаж, чел. ....	32.

На танкере типа «Оханефть» в качестве главного дизеля (ГД) установлен малооборотный дизель типа 5ДКРН 50/110-2, двухтактный, крейцкопфный, реверсивный с наддувом при постоянном давлении газов перед турбиной.

Судовой пропульсивный комплекс включает корпус судна, гребной винт фиксированного шага, валопровод и ГД фирмы «Бурмейстер и Вайн». Номинальная мощность ГД 2574 кВт, номинальная частота вращения  $170 \text{ мин}^{-1}$ , удельный расход топлива  $224,4 \text{ г/(кВт·ч)}$ . Топливная система ГД предусмотрена для работы его на тяжелом топливе.

На танкере типа «Оханефть» был установлен винт фиксированного шага с номинальным диаметром  $D = 3,7 \text{ м}$  и шагом  $S = 2,94 \text{ м}$ , который оказался «тяжелым» в эксплуатации. В связи с этим в 1983 г. ДВ ЦКБ ММФ была разработана документация по подрезке лопастей гребного винта в нескольких вариантах.

На танкерах «Усть-Кут», «Усть-Карск», «Гальве», «Усть-Илимск», «Усть-Лабинск» выполнена подрезка лопастей гребных винтов по первому варианту ( $D = 3,58 \text{ м}$ ,  $S = 2,94 \text{ м}$ ).

На танкерах «Оханефть», «Мыс Кодош», «Усть-Кан» и «Делегат» – по третьему варианту ( $D = 3,54 \text{ м}$ ,  $S = 2,94 \text{ м}$ ).

На танкерах последней постройки «Лукоморье», «Усть-Ижма» финская фирма «Раума-Репола» установила гребные винты, гидравлически облегченные за счет уменьшения шага винта ( $D = 3,7 \text{ м}$ ,  $S = 2,83 \text{ м}$ ).

В этой статье приведены результаты исследования по сокращению расхода топлива ГД 5ДКРН 50/110-2 с подрезкой гребного винта по третьему варианту ( $D = 3,58 \text{ м}$ ,  $S = 2,94 \text{ м}$ ), так как подрезка винта по первому варианту ( $D = 3,58 \text{ м}$ ) не дала ожидаемого результата.

### Определение текущей мощности ГД в эксплуатации

В связи с тем, что ГД 5ДКРН 50/110-2 с прямой передачей крутящего момента на винт фиксированного шага не обеспечен приборами автоматической регистрации мощности, оценка ее производится по косвенным показателям, которые фиксируются по истечении каждого часа в вахтенном машинном журнале. В качестве косвенного показателя принята частота вращения коленчатого вала дизеля. Для перехода от частоты вращения коленчатого вала ГД к его мощности используется их зависимость. Такая зависимость называется винтовой характеристикой дизеля.

Винтовая характеристика дизеля в аналитической форме с достаточной точностью рассчитывается в виде кубической параболы  $\overline{N_e} = c \cdot n^3$ , где  $\overline{N_e} = \frac{N_e}{N_{ном.}}$ ,  $n$  – частота вра-

щения коленчатого вала;  $c$  – коэффициент пропорциональности, который определяется по результатам стендовых испытаний ГД 5ДКРН 50/110-2 на тяжелом топливе (флотский мазут Ф-5), приведенных в табл. 1.

Таблица 1

**Результаты стендовых испытаний ГД 5ДКРН 50/110-2**

Table 1

**Results of bench tests of the ME 5 ДКРН 50/110-2**

Эффективная мощность, кВт	257,4	514,8	772,2	1030	1287	1544,4	1802	2059	2317	2574
Относительная мощность $\overline{N_e}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Частота вращения коленчатого вала $n$ , мин <sup>-1</sup>	80	100	115	126	135	143	150	158	165	170

Используя данные стендовых испытаний (см. табл. 1) и метод наименьших квадратов, получен коэффициент  $c = 2,03 \cdot 10^{-7}$ . Тогда

$$\overline{N_e} = 2,03 \cdot 10^{-7} n^3.$$

Средняя ошибка аппроксимации при этом составляет 1,48 % и показывает хорошее соответствие эмпирических и теоретических данных.

Графики эмпирической (см. табл. 1) и теоретической  $\overline{N_e} = 2,03 \cdot 10^{-7} n^3$  зависимостей относительной мощности  $\overline{N_e}$  ГД от частоты вращения коленчатого вала  $n$  представлены на рис. 1.

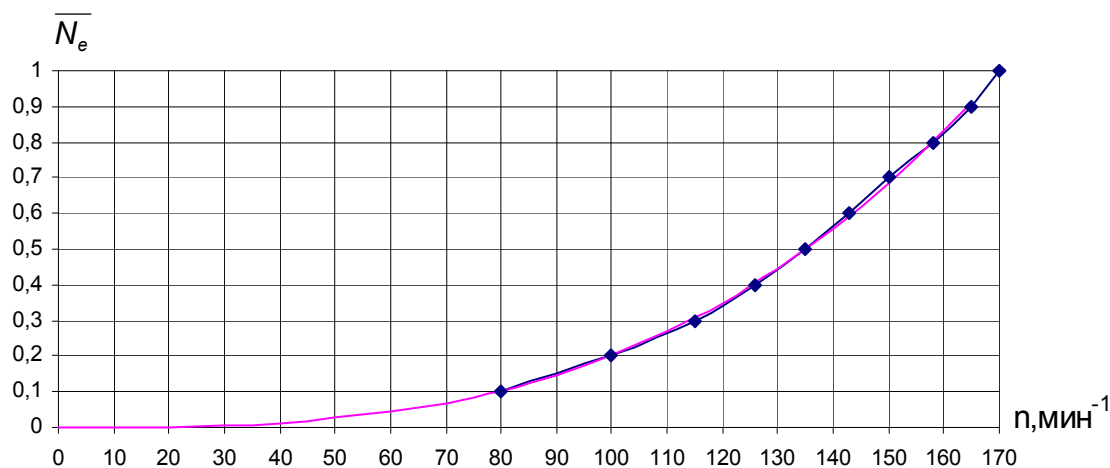


Рис. 1. Винтовая характеристика ГД 5ДКРН 50/110-2

Fig. 1. Propeller characteristics of main engine 5DKRN 50/110-2

**Режимы эксплуатации танкера и расчет параметров  
распределения мощности ГД на этих режимах**

Для сокращения расхода топлива необходимо знать распределение мощности ГД на всем диапазоне ее изменения от 0 до 1,0 номинальной мощности.

Характерными режимами эксплуатации танкера являются «переход в район промысла», «работа на промысле», «переход в порт». Параметры распределения мощности ГД

для указанных режимов эксплуатации получены для танкеров, имеющих подрезку гребного винта по третьему варианту ( $D = 3,54$  м,  $S = 2,94$  м). При этом статистические данные по мощности ГД для режимов «переход на промысел» и «переход в порт» объединены в одну группу.

Данные по распределению мощности ГД 5ДКРН 50/110-2 на режиме «переход» приведены в табл. 2.

По данным табл. 2 построен полигон распределения мощности ГД на режиме «переход» (рис. 2).

Таблица 2

Статистические данные по распределению мощности ГД на режиме «переход»

Table 2

Statistic data of distribution in power of the ME in the «passage» mode

Интервалы мощности в относительных единицах	Середина интервала	Продолжительность работы ГД $t$ , ч	Относительная продолжительность работы ГД $\bar{t}$
0-0,10	0,05	10	0,0090
0,10-0,20	0,15	54	0,0484
0,20-0,30	0,25	0	0,0000
0,30-0,40	0,35	36	0,0323
0,40-0,50	0,45	9	0,0081
0,50-0,60	0,55	25	0,0224
0,60-0,70	0,65	62	0,0556
0,70-0,80	0,75	197	0,1767
0,80-0,90	0,85	434	0,3892
0,90-1,00	0,95	288	0,2583
Итого		1115	1,000

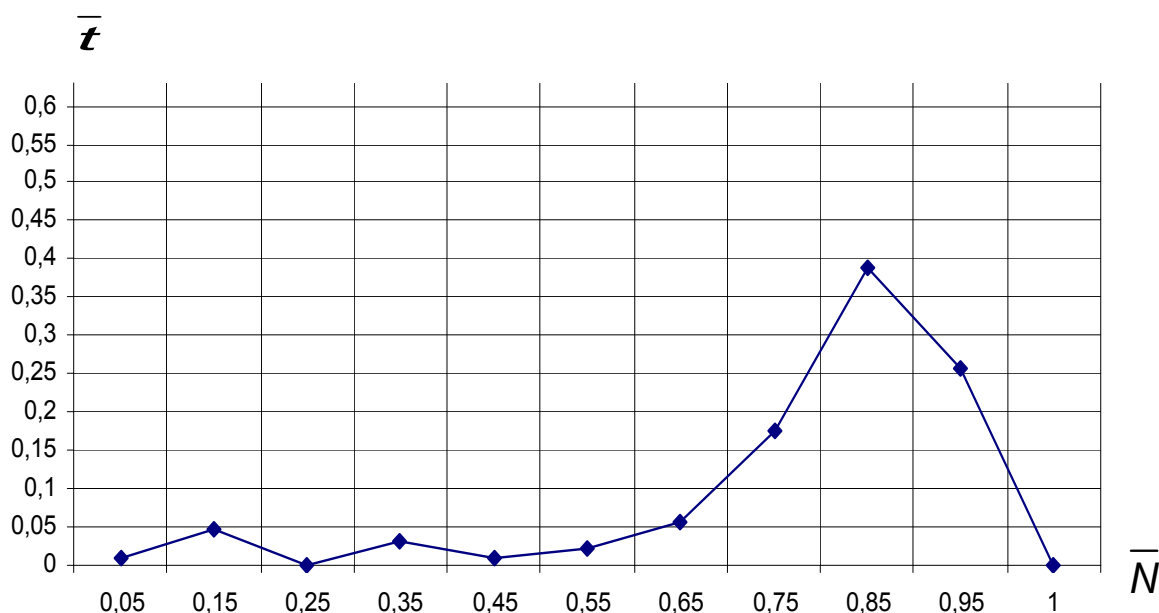


Рис. 2. Полигон распределения мощности ГД на режиме «переход»

Fig. 2. Power distribution range of the main engine on regime «at sea»

На режиме «переход» ГД 83 % времени работает с относительной мощностью, изменяющейся от 0,70 до 0,90 при среднем значении относительной мощности  $\bar{N}_c = 0,78$ , и среднеквадратическим отклонением  $\bar{\sigma} = 0,21$ . Характер распределения мощности ГД, как видно из полигона распределения, одномодальный. Интервал отклонения мощности ГД от среднего значения на режиме «переход» составляет от 1415,7 до 2136,42 кВт.  $((\bar{N}_c - \sigma) \cdot N_{ном}; (\bar{N}_c + \sigma) \cdot N_{ном})$ .

Статистические данные по распределению мощности ГД 5ДКРН50/110-2 танкера типа «Оханефть» на режиме «работа на промысле» приведены в табл. 3.

По данным табл. 3 построен полигон распределения мощности ГД на режиме «работа на промысле» (рис. 3).

Таблица 3

Статистические данные по распределению мощности ГД  
на режиме «работа на промысле»

Table 3

Statistical data on distribution of capacity of GD on a mode «work on trade»

Интервалы мощности в относительных единицах	Середина интервала	Продолжительность работы ГД $t$ , ч	Относительная продолжительность работы ГД $\bar{t}$
0,00-0,10	0,05	1339	0,3870
0,10-0,20	0,15	667	0,1928
0,20-0,30	0,25	91	0,0263
0,30-0,40	0,35	144	0,0416
0,40-0,50	0,45	236	0,0682
0,50-0,60	0,55	398	0,1150
0,60-0,70	0,65	417	0,1205
0,70-0,80	0,75	168	0,0486
Итого	-	3460	1,000

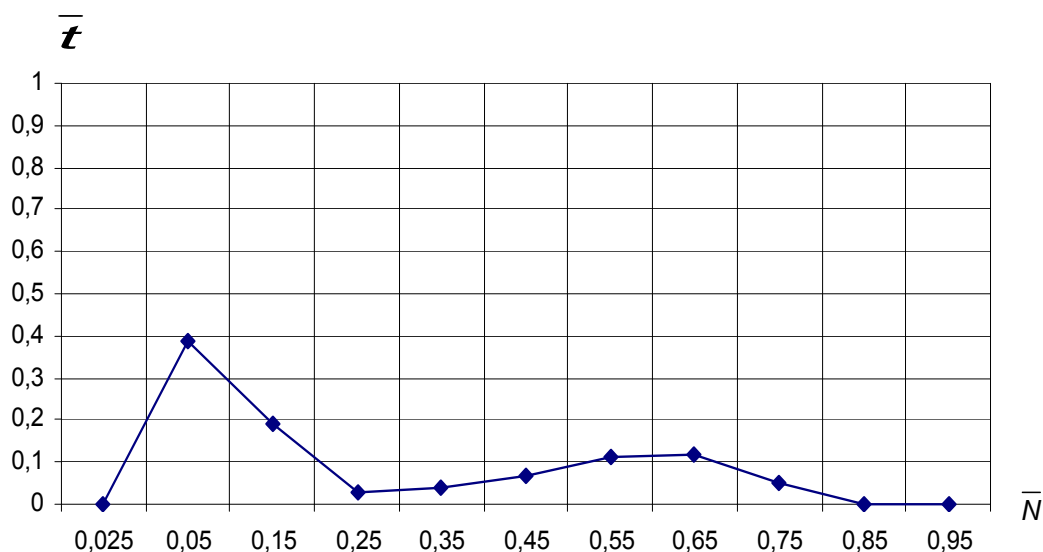


Рис. 3. Полигон распределения мощности ГД на режиме «работа на промысле»  
Fig. 3. The range of distribution of capacity of GD on a mode «work on trade»

Режим «работа на промысле» характеризуется малой мощностью ГД и имеет двух-модальное распределение. ГД 58 % времени работает с относительной мощностью, изменяющейся в интервале от 0,05 до 0,20 и 24 % времени в интервале от 0,45 до 0,75. При этом среднее значение относительной мощности  $\bar{N}_c = 0,28$  и среднее квадратическое отклонение  $\bar{\sigma} = 0,25$ .

Интервал отклонения мощности на режиме «работа на промысле» от ее среднего значения составляет от 77,22 до 1364,22 кВт.

Такое отклонение объясняется спецификой работы ТР с добывающими судами.

### Расчет расхода топлива ГД 5ДКРН 50/110-2

В эксплуатации текущая эффективная мощность ГД носит случайный характер. Она изменяется во времени в зависимости от режима эксплуатации, от условий внешних факторов и от состояния пропульсивного комплекса. Поэтому в основу расчета расхода топлива положен вероятностно-статистический метод обработки фактической мощности ГД. Этот метод наиболее полно учитывает многообразие внешних факторов, влияющих на элементы судового комплекса.

Для расчета расхода топлива необходима топливная характеристика ГД 5ДКРН 50/110-2. Топливная характеристика дизеля – это зависимость часового расхода топлива от его мощности, определяется по результатам стендовых испытаний.

Для расчета коэффициентов топливной характеристики ГД 5ДКРН 50/110-2 использовались результаты стендовых испытаний, которые приведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты стендовых испытаний ГД 5ДКРН 50/110-2

Table 4

Results of bench tests of the ME 5ДКРН 50/110-2

Эффективная мощность $N_e$ , кВт	Относительная мощность $\bar{N}$	Часовой расход топлива $G_T$ , кг/ч	Относительный часовой расход топлива $\bar{G}$	Удельный расход топлива $g_e$ , кг/(кВт·ч)
334,62	0,13	119,6	0,207	0,3574
1055,34	0,41	272,7	0,472	0,2585
1673,1	0,65	387,3	0,670	0,2315
2213,64	0,86	478,4	0,828	0,2161
2496,78	0,97	551,4	0,955	0,2208
2574	1,00	577,5	1,00	0,2244

$$N_n = 2574 \text{ кВт}, \quad G_n = 577,5 \text{ кг/ч}, \quad \bar{G} = \frac{G_T}{G_n}, \quad \bar{N} = \frac{N_e}{N_n}, \quad g_e = \frac{G}{N_e}.$$

Зависимость относительного часового расхода топлива от относительной мощности можно представить графически (рис. 4) или в аналитической форме в виде полинома второй степени, параметры которого определены по методу наименьших квадратов, используя данные табл. 4  $\bar{G} = 0,02\bar{N}^2 + 0,86\bar{N} + 0,1$ .

Средняя ошибка аппроксимации при этом составляет 1,97 %, что говорит о хорошем приближении эмпирических данных к теоретическим. На рис. 4 изображены эмпирическая и теоретическая линии топливной характеристики, они практически совпали.

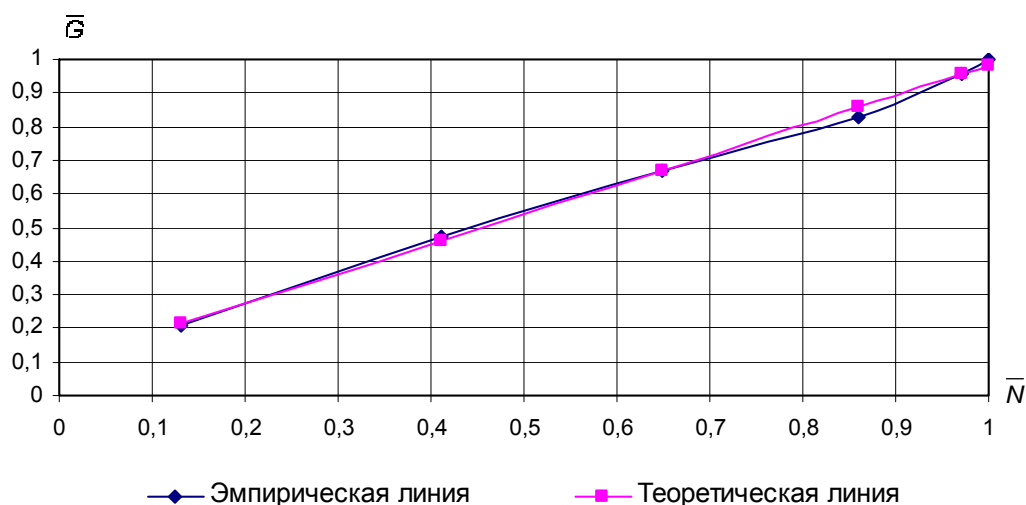


Рис. 4. Топливная характеристика ГД 5ДКРН 50/110-2  
Fig. 4. Main engine fuel oil characteristics ME 5DKPH 50/110-2

На основании топливной характеристики ГД и параметров распределения мощности на основных режимах эксплуатации танкера типа «Оханефть» определен расход топлива. Результаты расчета параметров мощности и расхода топлива для ГД 5ДКРН 50/110-2 танкера типа «Оханефть» на режимах «переход» и «работа на промысле» приведены в табл. 5.

Экономия топлива в сравнении с плановым расходом достигается за счет оптимально выбранных режимов эксплуатации ГД.

Таблица 5

**Параметры мощности и расхода топлива ГД 5ДКРН 50/110-2  
на режимах «переход» и «работа на промысле»**

Table 5

**Power rating and fuel oil consumption of the ME 5 ДКРН 50/110-2  
in the «passage» and «fishing» modes**

Наименование	Режим «переход»	Режим «работа на промысле»
Число наблюдений, ч	1115	3460
Средняя относительная мощность	0,78	0,28
Среднеквадратическое отклонение	0,21	0,25
Средний часовой расход топлива, кг/ч	454	198
Средний суточный расход топлива, т/сут	10,9	4,8

**Определение предпочтительной мощности ГД 5ДКРН 50/110-2  
по минимальному удельному расходу топлива**

Одним из путей повышения эффективности технической эксплуатации ГД танкера является оптимизация эксплуатационной мощности и расхода топлива, что приведет к снижению затрат на топливо, а следовательно, и к сокращению часового расхода топлива, зависящего от его удельного расхода и мощности, развиваемой ГД.

Зависимость удельного расхода топлива от относительной мощности ГД найдена по данным стендовых испытаний (см. табл. 4), построив график эмпирической кривой (рис. 5), теоретическую зависимость находим в виде полинома второй степени, параметры которого определены по методу наименьших квадратов.

$$g_e(\bar{N}) = 0,29\bar{N}^2 - 0,48\bar{N} + 0,4.$$

Средняя ошибка аппроксимации при этом составляет 1,19 %, что говорит о хорошем приближении.

Условием минимума функции  $g_e(\bar{N})$  является равенство нулю ее производной. Решением уравнения  $g'_e(\bar{N}) = 0,58\bar{N} - 0,48 = 0$  является  $\bar{N} = 0,83$ , а удельный расход топлива при этом 0,216 кг/(кВт·ч) – это минимальное значение функции.

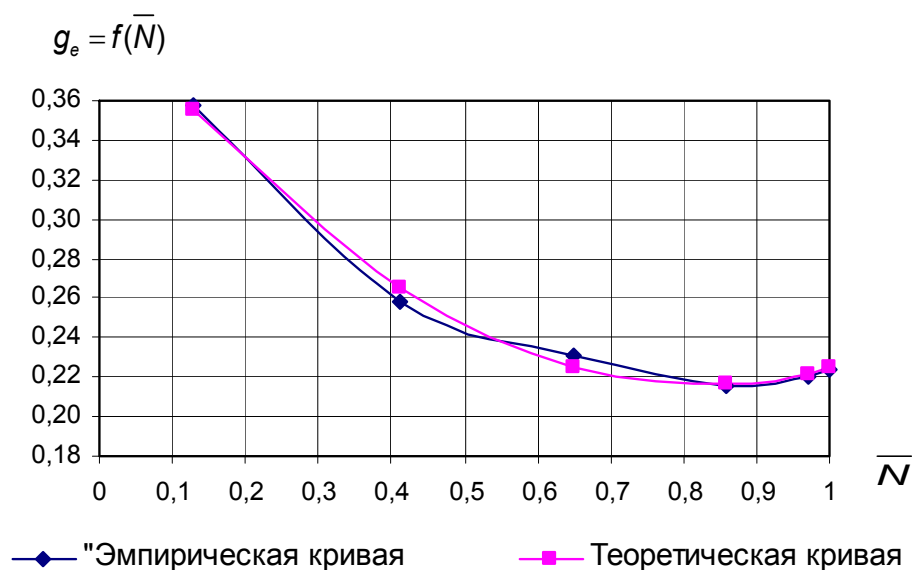


Рис. 5. Графики зависимости удельного расхода топлива от относительной мощности  
Fig. 5. Curve of relative power dependence on specific fuel oil consumption for main engine

Если принять значение функции, описывающей удельный расход топлива, равным 0,22 кг/(кВт·ч), т.е.  $g_e(\bar{N}) = 0,22$ , то область изменения предпочтительной относительной мощности  $\bar{N}$  ГД будет находиться в пределах от 0,7 до 0,9. Эффективная мощность при этом изменяется от 1802 до 2316,6 кВт.

Следовательно, для ГД 5ДКРН 50/110-2 предпочтительная мощность в указанной области характеризуется минимальными значениями удельного расхода топлива от 0,216 до 0,22 кг/(кВт·ч).

### Список литературы

Маницын В.В., Музалевский Н.В. Определение индивидуальных технически обоснованных норм расхода ГСМ СЭУ танкера типа «Оханефть»: отчет о НИР (промежуточ.) / Дальрыбвтуз; рук. Маницын В.В. – № ГРО 01860044670; Инв. №0287.0016466. – Владивосток, 1986. – 82 с.

**Сведения об авторах:** Капран Людмила Кузьминична, доцент;  
Маницын Владимир Викторович, профессор;  
Старовойтова Зоя Павловна, доцент.

УДК 656.6; 656.61; 656.62/.66

**Ю.А. Корнейчук**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **К ВОПРОСУ ВЫБОРА ТРЕНАЖЕРА МАШИННОГО ОТДЕЛЕНИЯ**

*Затрагиваются вопросы требований к аппаратным средствам и программному обеспечению тренажеров машинного отделения. Представлены оценки надежности тренажера машинного отделения фирмы Norcontrol. Применен новый подход к оценке выборочных наблюдений малого объема. Анализ показателей надежности указывает на необходимость резервирования главного компьютера тренажера. Программное обеспечение фирмы Konsberg Maritime не соответствует всем требованиям современного промыслового флота.*

**Ключевые слова:** тренажер машинного отделения, надежность, аппаратные средства, программные средства.

**Y.A. Korneychuk**

## **TO THE QUESTION OF THE ENGINE ROOM SIMULATOR SELECTION**

*The paper mentions questions of requirements to engine room simulator hardware and the software. Norcontrol engine room simulator reliability estimations are presented. The new approach to an estimation of small volume selective supervision is applied in the article. The analysis of reliability factors specifies in necessity of the simulator main computer reservation. Konsberg Maritime software does not correspond to all requirements of modern fishing fleet.*

**Key words:** engine room simulator, reliability, hardware, software.

Тренажеры Norcontrol по своим характеристикам относятся к динамическим тренажерам с пультами.

В случае отказа возникают простои оборудования средней длительностью 1 мес. Высокая стоимость ремонта и сменных деталей не позволяет обеспечить регулярное техническое обслуживание. В случае морального износа отсутствует возможность модернизации тренажера своими силами. Требуется полная замена пультов, элементной базы, программного обеспечения. Другими словами, потребуются новый тренажер. Высокая стоимость тренажеров СЭУ не способствует своевременной замене техники.

Цена ошибок оперативного персонала производств со сложным технологическим оборудованием многократно возрастает. Вспомним Чернобыльскую трагедию и экологическую катастрофу в Мексиканском зал. Особую важность приобретает качественное обучение и постоянное поддержание квалификации и готовности персонала, его противоаварийные тренировки. Компьютерный эксперимент позволяет не только сформировать моторно-рефлекторные навыки действий в сложных ситуациях, но и наглядно показать физическую сущность протекающих в оборудовании процессов, их взаимную зависимость, а также ряд существенных тонкостей, которым, к сожалению, не всегда придается значение на практике. Компьютерные модели могут также оказать неоценимую помощь при анализе аварий как с точки зрения накопления статистики, так и путем проведения машинного эксперимента по воспроизведению аварийной ситуации. Оптимальным вариантом является тренажер-конструктор с возможностью доработки и модернизации.

Одним из важнейших требований является реалистичность работы тренажера. Судовой механик большую часть работ выполняет, находясь в центральном посту управления судна. Все системы контроля и управления энергетической установкой компьютеризиро-

ваны. Поэтому компьютерный тренажер должен соответствовать имитируемому судну и перенастраиваться под требования заказчика.

Большинство требований удовлетворяются выбором модели имитируемой энергетической установки: два среднеоборотных дизеля транспортного или промыслового судна; мощный малооборотный дизель танкера; паровая турбина газовоза.

Однако опыт самой известной фирмы-производителя тренажеров Kongsberg Maritime (ранее Norcontrol) показывает, что затруднительно моделировать энергетику каждого судна. Поэтому при заказе тренажера СЭУ промыслового судна, например, траулера, документация и оборудование тренажера поставлялось для транспортного парома. Схема холодильной установки грузовых трюмов не соответствовала реальной и т.д.

Основным достоинством тренажеров Kongsberg Maritime считается использование динамических, пультовых тренажеров, которые имеют в своей основе математическую модель реальных физических процессов и потому наиболее полезны для качественного обучения персонала.

На рис. 1 представлен общий вид центрального поста управления (Control Room) тренажера первого поколения (Norcontrol, 1988 г.). Дополнительно можно заказать мнемосхему машинного отделения, макет вспомогательного котла и другое вспомогательное оборудование. Разработчик смог упростить модель без ущерба качеству переходных процессов с достаточной точностью и реалистичностью. Все программное обеспечение тренажера фирмы Norcontrol вмещалось на пятидюймовой дискете емкостью 1,2 МВ. Класс автоматизации А1. Управление всеми механизмами и системами ведется с пульта оператора в режиме дистанционного управления (Remote Control) или в режиме (Manual) на местных пультах управления. На монохроматических мониторах отображается текст на английском языке, цифры и коды. Имитируется звук работающих механизмов, звуковая и световая сигнализация и т.п.

На рис. 2 представлен общий вид центрального поста управления современного тренажера машинного отделения (Kongsberg Maritime, 2010 г.). Сохранена



Рис. 1. Пульт управления тренажера машинного отделения фирмы Norcontrol

Fig. 1. Norcontrol engine room simulator control console

преимущество в компоновке тренажера. Программное обеспечение выполнено в среде Windows. На цветных мониторах отображаются схемы систем, рисунки механизмов, индикаторы режимов работы. Управление энергетической установкой ведется с компьютерной консоли и с местных постов управления.

Выбор тренажера машинного отделения определяется рядом ограничений. Заказ натуральной модели главной энергетической установки сопряжен со сложностью его раз-

мещения и обслуживания. Например, в китайском Морском университете в лаборатории установлен шестицилиндровый малооборотный дизель MAN MC60. Компьютерная модель тренажера имеет ряд преимуществ в стоимости, экологии, эргономике, способности к модернизации. Студентам для эффективности обучения нужны не внешние характеристики объекта, а его «начинка».



Рис. 2. Пульт управления современного тренажера машинного отделения  
фирмы Kongsberg Maritime

Fig. 2. Modern Kongsberg Maritime engine room simulator control console

Недостатком тренажера можно считать то, что используемая компьютерная программа не подлежит доработке. Известны программы-конструкторы тренажеров, в которых можно менять структуру энергетической установки.

Известен вариант быстрого обучения обслуживанию сложной военной техники способом визуального наложения видеоматериала на очки с встроенным дисплеем.

Тренажер машинного отделения (далее тренажер) программно и технически должен соответствовать требованиям к компетенции судовых механиков, электромехаников, рефрижераторных механиков. В работе [1] показано, что тренажер фирмы Norcontrol в основном удовлетворяет этим требованиям для судовых механиков. Требования к компетенции электромехаников и рефмехаников не представлены в документах Международной конвенции по дипломированию и несению вахты моряков [2].

На сегодняшний день отсутствуют конвенционные требования об обязательном включении в программы обучения и повышения квалификации специалистов судомеханической службы тренажерной подготовки. Однако многие учебные заведения приобрели и используют эти тренажеры. Фирма Norcontrol (Kongsberg Maritime) поставила серию тренажеров на Дальний Восток в 1988 г. Среди получателей на Дальнем Востоке можно назвать вузы: Камчатский государственный университет (Петропавловск-Камчатский), Морской государственный университет имени адм. Г.И. Невельского, Филиал Института

повышения квалификации руководящих работников и специалистов рыбной промышленности и хозяйства (сейчас ИПК Дальрыбвтуза), Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет (Дальрыбвтуз). Указанные тренажеры СЭУ выработали свой ресурс. Существует проблема выбора новых недорогих и надежных тренажеров, соответствующих требованиям к компетенции специалистов судомеханической службы судна. Для обоснования полноценной замены следует проанализировать их надежность и другие потребительские свойства.

Объектом исследования является надежность и реалистичность функций тренажера. Методы исследований сводятся к проведению тестовых испытаний тренажеров и сбору информации об отказах.

Международная конвенция по управлению безопасной эксплуатацией судов (МКУБ) предполагает усиление контроля надежности судовых технических средств [3]. На судах используются системы управления и автоматизированного технического обслуживания и ремонта. Эта тенденция получила развитие в практике создания тренажеров. В работе [4] представлен опыт обучения курсантов и судовых механиков при использовании диагностического тренажера «Турбодизель 3». Помимо наведения стандартных дефектов машин и механизмов и отклонений режимов их работы, введена функция оценки стоимости принятых решений. Студент, который потратил меньше денег на техническое обслуживание, ремонт и топливо в моделируемых тренажером эксплуатационных задачах, будет более востребован на производстве.

Далее приведен 25-летний опыт использования тренажера судовой дизельной установки Dieselsim. Предлагаемый материал не претендует на полноценное исследование надежности тренажеров машинного отделения фирмы Norcontrol в силу их небольшого количества и незначительного числа наблюдений за отказами для статистического исследования. Поставлена цель дать рекомендации по формированию заказа тренажерной техники.

ИПК Дальрыбвтуза с 1988 г. эксплуатирует тренажер СЭУ и с 1991 г. тренажер холодильной установки рефрижераторного трюма. В 1988 г. вышел из строя блок питания главного компьютера ND 110 Compact. В течение месяца заменен новым, который до сих пор исправно работает. В 2005 г. наблюдались отказы контроллеров локальных систем управления. Исправлено заменой оборудования. В 2008 г. вышла из строя материнская плата главного компьютера ND 110 Compact. Произведена замена платы. В 2009 г. вышел из строя накопитель гибких магнитных дисков формата 5 дюймов (НГМД). Произведена замена. В 2012 г. сгорел стабилизатор блока питания всего тренажера. Произведена замена. С 2012 г. тренажер не функционирует в полном объеме. При попытке провести полный запуск энергетической установки компьютер ND 110 Compact «зависал» через 1 ч работы.

Остался возможным запуск отдельных систем, заранее записанных на дискету: главная энергетическая установка, холодильная установка, электростанция.

В силу малости числа наблюдений за отказами тренажера нельзя полноценно применить в исследовании положения математической статистики и теории надежности. Поэтому попробуем проанализировать последовательность разных видов отказов. Такой подход может дать лишь приближенные оценки технического состояния тренажера. В отсутствие репрезентативной выборки статистических данных об отказах тренажера воспользуемся широко известными статистическими данными об отказах комплектующих персональных компьютеров.

Данные отказов одного тренажера Norcontrol за 25 лет работы представлены в табл. 1 в виде наблюдаемого и нормированного значения. Нормированные значения получены по данным большого массива наблюдений за идентичными комплектующими.

Таблица 1

### Данные отказов тренажера Norcontrol

Table 1

### Norcontrol engine room simulator failure data

Компоненты тренажера	Наработка до отказа, лет	
	Наблюдение	Норма
Блок питания главного компьютера ND-100	1	11
Системная плата главного компьютера ND-100	12	11
Дисковод формата 5" главного компьютера ND-100	10	5
Контроллер местного пульта управления тренажера	12	10
Вторичные приборы (логометрия)	10	10
Стабилизатор питания тренажера (220 В)	20	15

Таблица 2

### Показатели надежности комплектующих ПК

Table 2

### Personal computer's components reliability factors

Комплектующие ПК	Наработка до отказа,		Вероятность	
	тысяч часов	лет	отказа за год	безотказной работы за год
Системная плата	100	11	0,09	0,91
Видеокарта	55	6	0,17	0,83
Процессор	55	6	0,17	0,83
Память RAM	500	60	0,01	0,99
Жесткий диск	500	60	0,01	0,99
Вентилятор	55	6	0,17	0,83
Блок питания	100	11	0,09	0,91
Итого				0,46

Сопоставим данные табл. 1 по отказам компонентов тренажера Norcontrol с данными табл. 2 отказов стандартного персонального компьютера (ПК).

В табл. 2 приведены показатели надежности персональных компьютеров, собранных в фирме, которая использует обычные комплектующие и дает гарантию на изделие 1 год.

Сравним данные табл. 1 и 2 по упрощенному показателю наработки до отказа в годах. Больших расхождений данных не наблюдается. Значительное расхождение данных первой строки (см. табл. 1) объясняется заводским дефектом. После замены аналогичный блок проработал 24 года.

В заключение подведем некоторые итоги. Динамический тренажер фирмы Norcontrol (Konsberg Maritime) представляет собой один из лучших образцов, использующих моделирование физических и энергетических процессов в реальном времени.

К недостаткам тренажера следует отнести отсутствие возможности выбора структуры тренажера подобно тренажеру-конструктору. Фирма Konsberg Maritime не представила тренажер энергетической установки современного промышленного судна.

В отсутствие репрезентативной выборки статистических данных об отказах тренажера использованы данные об отказах аналогичных комплектующих ПК. Так как главный компьютер тренажера по условиям надежности является слабым звеном, то подлежит резервированию. С учетом этих поправок срок службы тренажера – 20 лет.

---

### Список литературы

1. Vagabov I.I., Sobolenko A.N., Korneychuk Y.A. Diesel Simulator as Unique Means for Bringing of Marine Engineers' Competence in Conformity with the Requirements of the STCW 95 Convention // Proceedings of 5th International Conference on Engine Room Simulators: Singapore Politechnic, Singapore, 25-26 June, 2001.
2. Международная конвенция о подготовке, дипломировании и несении вахты моряков (ПДМНВ-78/95). – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1996. – 552 с.
3. Международный кодекс по управлению безопасной эксплуатацией судов и защитой окружающей среды (МКУБ). Сборник № 1. Международные и национальные документы, регулирующие управление безопасностью мореплавания. – СПб.: ЗАО ЦНИИМФ, 1997.
4. Kluj S. The Relation Between Learning Objectives and the Appropriate Simulator Type // Proceedings of 5th International Conference on Engine Room Simulators: Singapore Politechnic, Singapore, 25-26 June, 2001.

**Сведения об авторе:** Корнейчук Юрий Алексеевич,  
кандидат технических наук, доцент, e-mail: korneych@mail.ru.

УДК 621.431.74.016

**Б.И. Руднев, О.В. Поваляхина**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

## **ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ РАБОЧЕГО ТЕЛА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ**

*Представлены поля скоростей рабочего тела в камере сгорания дизельного двигателя, полученные численным методом. Показаны возможности их использования для расчета локальных конвективных тепловых потоков.*

**Ключевые слова:** дизельный двигатель, камера сгорания, поля скоростей, газы, локальный конвективный тепловой поток.

**B.I. Rudnev, O.V. Povalikhina**

## **FLOWFIELDS OF GASES IN DIESEL ENGINE COMBUSTION CHAMBER**

*Flowfields of gases received by numerical method in diesel engine combustion chamber are given. The passivities of their usage for calculation local convective heat fluxes are shown.*

**Key words:** diesel engine, combustion chamber, flowfields, gases, local convective heat flux.

### **Введение**

Современные тенденции развития дизелей связаны, прежде всего, с увеличением их удельной мощности, улучшением экономических и экологических характеристик. Это обуславливает появление целого ряда проблем, и одна из важнейших из них – возрастание теплонапряженности деталей, образующих камеру сгорания (КС). Взаимодействие рабочего тела со стенками КС приводит к крайне неравномерному тепловому нагружению ее деталей. Высокие локальные тепловые потоки на указанных поверхностях являются основной причиной низкой эксплуатационной надежности современных форсированных дизельных двигателей.

Вместе с тем процессы локального радиационного и конвективного теплообмена между рабочим телом и стенками КС все еще остаются недостаточно изученными. Достоверная расчетная оценка теплового и напряженно-деформированного состояния деталей цилиндропоршневой группы как на стадии проектирования, так и при доводке конструкций вызывает серьезные трудности. Они обусловлены главным образом правильностью задания локальных граничных условий со стороны рабочего тела. В связи с этим создание надежных, экспериментально обоснованных расчетно-теоретических методов исследования локального радиационного и конвективного теплообмена в КС дизелей является весьма сложной и актуальной проблемой.

### **Определение локальной плотности конвективного теплового потока на поверхностях деталей камеры сгорания**

Математическая модель (ММ) конвективного теплообмена в КС дизеля, разработанная одним из авторов [1], предусматривает расчетное определение локальных потоков этого вида переноса теплоты для поверхностей крышки цилиндра, поршня и втулки как функции угла поворота коленчатого вала (ПКВ). При этом рабочее тело в КС дизеля рассматривается условно состоящим из ядра потока и турбулентного пограничного слоя. Выполненными расчетными оценками установлено, что для дизелей типа 8ЧН 13/14 и

аналогичных ему скорость звука в КС лежит в пределах 520-880 м/с. В то же время величина скорости рабочего тела в дизелях с КС типа ЯМЗ и им подобных укладывается в диапазон 10-70 м/с. Сопоставление последних со скоростями звука показывает, что условие  $v < 0,25a$  выполняется во всем диапазоне угла ПКВ, при котором передается основная часть теплоты от рабочего тела к стенкам деталей, образующих КС (процессы сгорания и расширения рабочего тела). Подробный анализ системы дифференциальных уравнений конвективного теплообмена применительно к КС дизелей показал, что течение рабочего тела в ядре потока можно считать невязким. Кроме этого, в дизелях, имеющих КС типа ЯМЗ, ЦНИДИ, КАМАЗ и им подобных, движение рабочего тела в ядре потока можно считать осесимметричным и перейти от трехмерной к двумерной постановке задачи. При этом система уравнений в частных производных, описывающая фундаментальные законы сохранения массы, импульса и энергии применительно к течению рабочего тела в потенциальном ядре потока в КС дизеля, запишется в цилиндрической системе координат следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right) = 0, \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial z} = 0, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial r} = 0, \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} + p \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial (ru)}{\partial r} \right) = 0, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность рабочего тела в КС, кг/м<sup>3</sup>;  $E$  – внутренняя энергия рабочего тела;  $u, v$  – вертикальная (осевая) и радиальная проекции вектора скорости рабочего тела в КС, м/с;  $z, r$  – вертикальная (осевая) и радиальная координаты цилиндрической системы, м.

Уравнения (1)-(4) решались численно на ЭВМ по специально разработанной программе с применением итерационного метода [1]. При этом использовались лагранжевы координаты и неявная полностью консервативная разностная схема. В расчетах условий течения рабочего тела в КС 8 ЧН 13/14 использовались регулярные сетки размером  $25 \times 20$  для плоской поверхности днища поршня и  $30 \times 20$  для днища со сложным профилем поверхности. Рассмотрение и численное решение задач течения рабочего тела в КС с плоским днищем поршня были обусловлены необходимостью выяснения ряда как общих закономерностей, так и особенностей такого течения, а также отработкой алгоритма и программы численного решения уравнений на ЭВМ. В результате были получены поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела в объеме КС при различных углах ПКВ. Для КС со сложным профилем поверхности поршня типа ЦНИДИ, ЯМЗ, Гессельман и др. возможно, как показали выполненные на ЭВМ расчеты, использование рекомендаций С. Патанкара [2] о блокировке некоторых расчетных областей регулярной конечно-разностной сетки. Полученные расчетные поля скоростей, температуры, плотности и давления рабочего тела были затем использованы как входные параметры для расчета локального конвективного теплового потока [3]. Расчетная зависимость для локальной плотности конвективного теплового потока построена на локальном соотношении

энергии для турбулентного пограничного слоя. Путем преобразований с использованием закона теплообмена, справедливого для обтекания плоской пластины несжимаемым не-изотермическим потоком рабочего тела при турбулентном пограничном слое с последующим интегрированием, указанное выше соотношение приводится к уравнению, включающему локальные значения критерия Стентона и ряда других параметров:

$$St = C Re_L^{-m/(1+m)} \psi_T \Delta T^m \left[ \int_0^{\tilde{x}} \psi_T \Delta T^{1+m} d\tilde{x} \right]^{-m/(1+m)}, \quad (5)$$

где  $Re_L$  – число Рейнольдса, построенное по характерному размеру поверхности;  $\psi_T$  – коэффициент, учитывающий влияние неизотермичности на теплоотдачу;  $\Delta T$  – температурный напор, К;  $\tilde{x}$  – относительный радиус крышки цилиндра или поршня.

Полученное локальное значение критерия Стентона в совокупности с локальными значениями скорости, температуры, плотности и теплоемкости рабочего тела однозначно определяют локальную плотность конвективного теплового потока:

$$q_w = C_{p\infty} \rho_{\infty} W_{\infty} \Delta T^{m+1} C Re_L^{-m/(1+m)} \psi_T \left[ \int_0^{\tilde{x}} \psi_T \Delta T^{1+m} d\tilde{x} \right]^{-m/(1+m)}, \quad (6)$$

где  $C_{p\infty}$ ,  $W_{\infty}$ ,  $T_{\infty}$  – изобарная теплоемкость, скорость и температура рабочего тела в КС.

Выполненные на ЭВМ расчеты с использованием зависимости (6) позволили получить распределение локальной плотности конвективного теплового потока по всем поверхностям КС. В частности, для поверхности крышки цилиндра он составил  $1,2 \cdot 10^6 - 2,3 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

### Поля скоростей рабочего тела

Поля скоростей (распределение вектора скорости) рабочего тела в КС были получены в результате численного решения дифференциальных уравнений основных законов сохранения. Последние были ранее подробно проанализированы в [1]. Визуализация поля скоростей проводилась на ЭВМ с помощью специальных графических программ Surfer и Grapher фирмы Golden Software inc., Golden, Colorado, USA.

На рис. 1 и 2 показаны распределения вектора скорости рабочего тела в КС с плоским днищем. Ось цилиндра двигателя на этих рисунках показана справа и совпадает с осью симметрии КС в численном решении. Следует отметить, что численное решение на ЭВМ задачи внешнего течения для КС с плоским днищем поршня было выполнено с двумя целями. Первая цель – отработка на ЭВМ соответствующего алгоритма и программы, а также определение с ее помощью основных параметров внешнего течения. Вторая цель – оценка влияния начальных условий на параметры внешнего течения рабочего тела в КС. Указанные цели были достигнуты в процессе многовариантных расчетов на ЭВМ.

Полученные при этом результаты по полям скоростей в качественном и количественном отношении хорошо согласуются с аналогичными расчетными и экспериментальными исследованиями, выполненными в последнее время [4, 5, 6].

Анализ полей скоростей, представленный на рис. 1 и 2, позволяет сделать вывод о том, что в случае плоского днища поршня движение рабочего тела около его поверхности имеет примерно радиальный характер. Вдоль огневой поверхности крышки цилиндра движение рабочего тела носит четко выраженный радиальный характер.

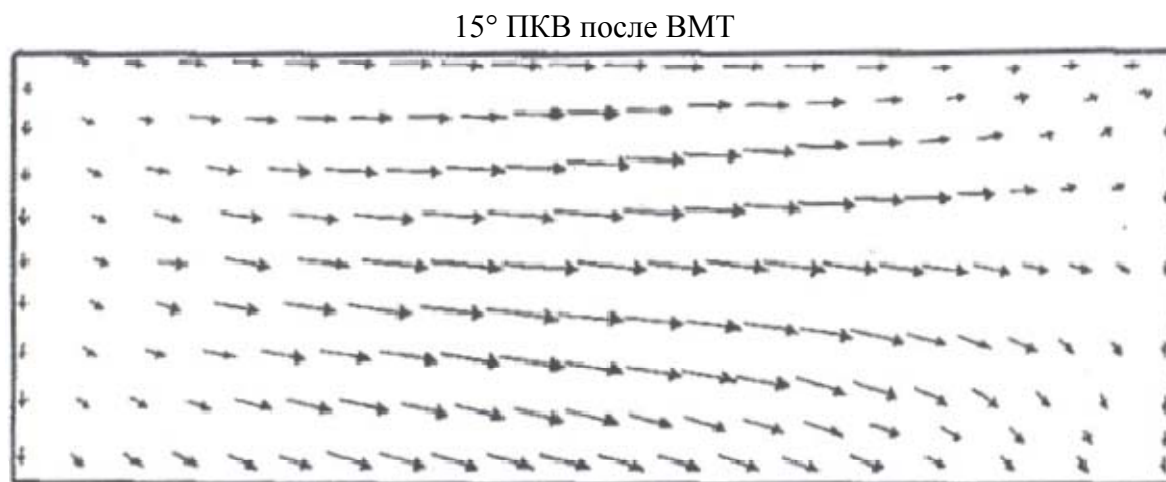


Рис. 1. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с плоским днищем поршня, полученное численным методом

Fig. 1. Gases flowfields distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with flat of piston

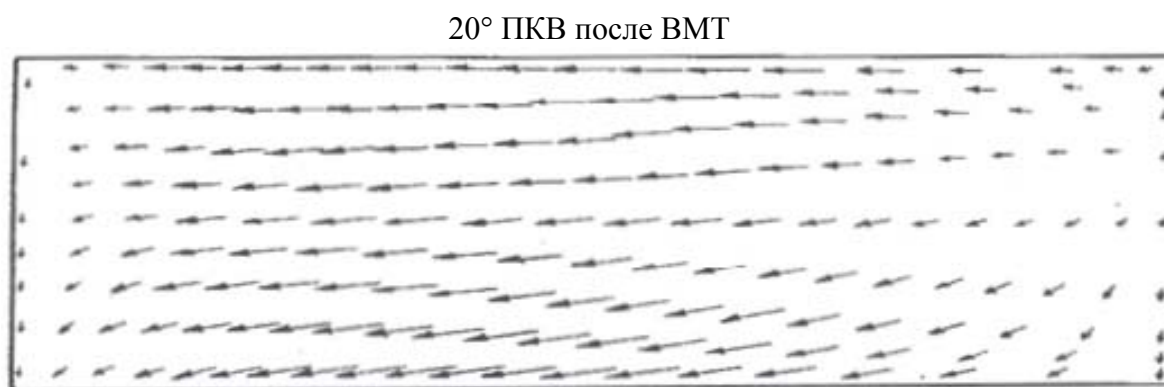


Рис. 2. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с плоским днищем поршня, масштаб вектора скорости 5 мм – 10 м/с

Fig. 2. Gases flowfields distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with flat of piston, scale vector of velocity 5 mm – 10 m/s

Поля скоростей рабочего тела в КС с фигурным днищем поршня для различных углов ПКВ после ВМТ показаны на рис. 3, 4 и 5.

На этих рисунках ось цилиндра располагается справа, поршень – в нижней части рисунков и движется от ВМТ. Следует отметить, что в этом случае поля скоростей рабочего тела отличаются от таковых по сравнению с КС, имеющей плоское днище поршня.

Во-первых, принципиально меняется качественная картина течения рабочего тела в объеме КС. В углублении КС в поршне в районе кромки течение меняет свое направление. При этом в потоке рабочего тела образуются вихревые структуры. Последние, безусловно, должны интенсифицировать процесс теплообмена между рабочим телом и поверхностью днища поршня в районе кромки КС. Это положение полностью подтверждается результатами глубоких экспериментальных исследований, выполненных специалистами фирмы «Даймлер – Бенц» [7]. Анализ этой работы приведен ранее в [1], а часть полученных в ней экспериментальных данных – в [3]. Течение рабочего тела около поверхности крышки цилиндров и в этом случае имеет в основном радиальный характер.

10° ПКВ после ВМТ

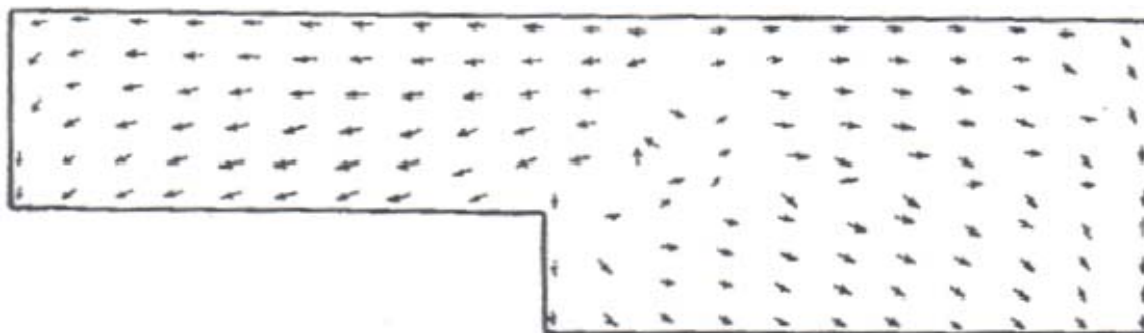


Рис. 3. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня, полученное численным методом

Fig. 3. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston

15° ПКВ после ВМТ

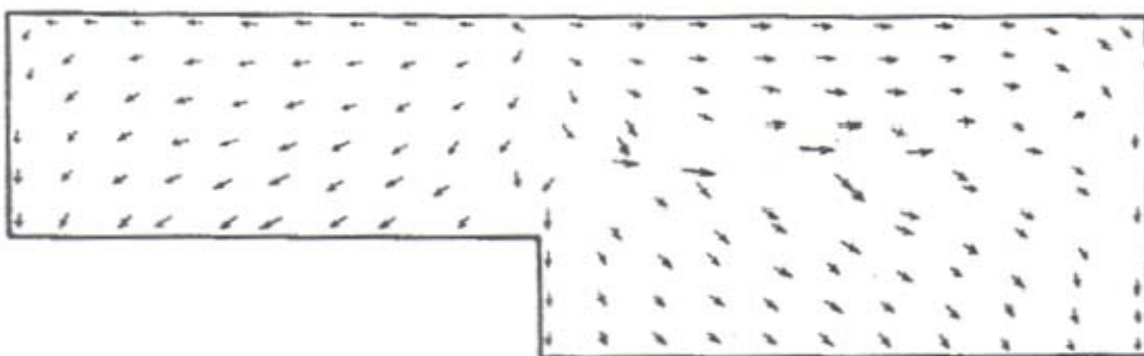


Рис. 4. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня,  $P_{me} = 0,61$  МПа,  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup>, масштаб вектора скорости 2,5-10 м/с

Fig. 4. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston,  $P_{me} = 0,61$  МПа,  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup>, scale vector of velocity 2,5 mm – 10 m/s

20° ПКВ после ВМТ

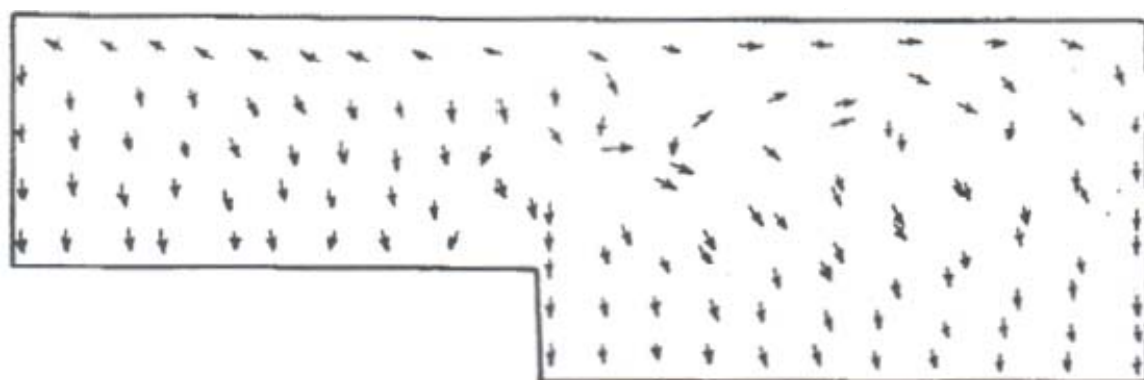


Рис. 5. Распределение вектора скорости рабочего тела в вертикальной симметрии в КС с фигурным днищем поршня,  $P_{me} = 0,61$  МПа,  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup>, масштаб вектора скорости 2,5-10 м/с

Fig. 5. Gases flowfield distribution in vertical plan of symmetry in combustion chamber with crooked surface of piston,  $P_{me} = 0,61$  МПа,  $n = 1700$  мин<sup>-1</sup>, scale vector of velocity 2,5 mm – 10 m/s

Во-вторых, с количественной точки зрения величина локальной скорости рабочего тела в случае с фигурным днищем поршня существенно отличается от таковой, полученной при численном решении на ЭВМ для плоского днища поршня. Причем максимальные скорости рабочего тела наблюдаются в районе кромки КС в поршне и составляют 11-19 м/с. Указанные расчетные значения локальных скоростей рабочего тела хорошо согласуются с результатами исследований, выполненных с применением других, отличных от нашей, математических моделей [8].

### Заключение

Рассмотренные поля скоростей рабочего тела были использованы для расчета нестационарных локальных конвективных тепловых потоков на поверхности деталей КС в рамках предложенной в [1] математической модели. Сравнение расчетных и экспериментальных данных по указанным выше тепловым потокам показало их различие в пределах 10-15 %, что следует признать вполне приемлемым при проектировании и доводке современных высокофорсированных дизельных двигателей.

### Список литературы

1. Руднев Б.И. Процессы локального теплообмена в камере сгорания дизелей. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 221 с.
2. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
3. Руднев Б.И., Повалихина О.В. Процессы теплообмена в камере сгорания дизельных двигателей. Эксперимент и математическое моделирование. – Saarbrücken (Germany): LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 112 с.
4. Bopp S., Vatisdis C., Whitelaw J.H. In cylinder velocity measurements with a mobile fiber optic LDA system // SAE Techn Pap. Ser. – 1990. № 900055. – P. 1-12.
5. Bozza F., Cameretti M.C., Tuccillo R. Numerical simulation of in-cylinder processes and duct flow in a light duty diesel engine // Fourth International Symposium on Small Diesel Engines. – Journal of Polish CIMAC. – Vol. 2, №. 1. Warsaw, Poland, 1996. – P. 51-56.
6. Amsden A. KIVA-3V: a block – structured KIVA Program for Engines with Vertical or Canted Valves. Los Alamos National Lab. Rep. LA-13313 – MS, 1997.
7. Bargende M., Putter R.G. Ermittlung der Ladungs bewegung in motorischen Brennraumen durch Messung instationarer Oberflächen temperaturverläufe // MTZ. – 1986. № 12. – P. 533-538.
8. Cray B., Kikuta K., Chikahisa T. et al. Causes of calculation instabilities and their countermeasures for KIVA, a three-dimensional program for combustion and fluid flow in I.C. engines // Mene. Fac. Eng. Hokkaido Univ. – 1992. – Vol. 18, № 3. – P. 1-13.

**Сведения об авторах:** Руднев Борис Иванович, доктор технических наук, профессор; Повалихина Ольга Владимировна, доцент, e-mail: povalichina@mail.ru.

УДК 656.612

**А.Н. Соболенко**

Дальневосточный государственный технический рыбохозяйственный университет,  
690087, г. Владивосток, ул. Луговая, 52б

### **АВАРИЙНОЕ ПРОИСШЕСТВИЕ С ГЛАВНЫМИ ПАРОВЫМИ КОТЛАМИ НА ПЛАВБАЗЕ «АРМАНЬ»**

*Выполнен анализ аварийного происшествия с главными паровыми котлами на плавбазе «Армань». Произошел разрыв водогрейных трубок и их деформация, ослабление посадки в местах вальцовки в результате неправильной эксплуатации паровых котлов судовым обслуживающим персоналом. Показаны нарушения действующих нормативных документов по эксплуатации судовых паровых котлов судовыми механиками – второй механик, третий механик и старший механик, а также капитана судна и начальника МСС. Установлено, что при эксплуатации главных судовых паровых котлов были такие нарушения, как несоблюдение сроков между котлоочистками, несоблюдение водного режима котла, выпуск воды в котле, систематический перегруз котла. Установлено, что непосредственной причиной разрыва водогрейных трубок был выпуск воды в котле, усугубленный предшествующими систематическими нарушениями правил технической эксплуатации.*

**Ключевые слова:** паровые котлы, аварийное происшествие, котлоочистка, выпуск воды, водный режим котла, перегруз котла.

**A.N. Sobolenko**

### **AN ACCIDENT WITH MAIN STEAM BOILERS ON FLOATING FISH FACTORY «ARMAN»**

*The analyzes of the accident with main ship stem boilers on floating fish factory «Arman» was made. Cracks and deformations of water-heating pipes, slackening of their fastening were happened. This accident took place due to an abnormal operation by service personal. Violations of active regulatory documents for operation ship steam boilers by marine engineers – second engineer, third engineer, chief engineer, captain and head of mechanical ship services were displayed. It was determined that during operation of main ship stem boilers the such violations as nonobservance of period between boiler cleaning, nonobservance of boiler water regime, descent of water level in boiler, regular overloading of boiler were occurred. It was determined that the direct reason of cracks of water-heating pipes was descent of water level in boiler aggravated previous regular violence of the Rules of technical operation of ship steam boilers.*

**Key words:** seam boilers, an accident, boiler cleaning, the descent of water level in boiler, boiler water regime, overloading of boiler.

Нельзя достоверно прогнозировать безопасность эксплуатации такого сложного технического объекта СЭУ, как паровой котел без учета взаимодействия с машинной командой. Иногда неправильные действия или бездействие членов машинной команды может привести к аварии. В данной статье описывается случай аварийного происшествия с главными паровыми котлами, имевший место на плавбазе «Армань», по причине систематического нарушения правил технической эксплуатации судовых паровых котлов судовыми механиками. По материалам аварии было возбуждено уголовное дело в отношении ряда должностных лиц.

Плавбаза «Армань» – это плавбаза проекта В-69, построенная в Польше в 1974 г., имеет главную силовую установку, состоящую из двух главных паровых машин, приводящих во вращение два винта фиксированного шага посредством прямой передачи.

На плавбазе «Армань» установлены два главных паровых котла марки WB-1 с номинальной паспортной производительностью 17,5 т/ч каждый.

13 декабря 1982 г. произошла авария с главными паровыми котлами на плавбазе «Армань» при нагрузке котла 50 % номинальной. При этом тепловые напряжения в топке были невелики. Температура перед первым котельным пучком была меньше, чем при номинальной нагрузке и перегрузке котла. Авария произошла через 20 дней после прибытия в порт с района промысла и работы котлов в течение этого периода с пониженной нагрузкой.

В результате обследования котла было выявлено следующее.

1. Трубы нижнего ряда диаметром 44,5 мм в районе разорвавшейся трубы имеют деформацию до четырех диаметров. Труба № 11 имеет разрыв длиной 200 мм, труба № 4 – свищ примерно 20 мм; крюки-подвески пароперегревателя сгорели. Разрыв и свищ возникли одновременно, т.е. имеется множественное повреждение труб.

2. Разрыв произошел с образованием острых кромок. Такие разрушения вызываются, как правило, закупоркой шламом, кусками накипи, деталями внутренних частей барабанов, предметами, забытыми во время ремонта, упуском воды [5]. Осмотром установлено, что закупорки шламом и посторонними предметами не было.

3. Водогрейные трубки в количестве 714 шт. имеют ослабленную посадку в местах вальцовки, т.е. при эксплуатации была течь многих труб в вальцовке, что легко могло быть замечено обслуживающим персоналом.

4. Поверхность трубок загрязнена.

Авария развивалась следующим образом.

Как было установлено, произошел упуск воды. При упуске воды в котле обнажились вначале верхние ряды труб. Однако температура газов была недостаточной для перегрева металла труб, но достаточной для их деформации, т.е. происходила просадка труб и как следствие нарушение вальцовки (714 шт. труб имели ослабленную посадку). При дальнейшем испарении воды скорость обнажения оставшихся труб увеличивалась за счет уменьшения объема находящейся в трубах воды. Если бы котел работал с максимальной нагрузкой, то следовало бы ожидать разрыв труб выше первого пучка, т.е. там, где температура газов достигает величины перегрева металла. Чем ниже нагрузка, тем ближе к аварийному ряду будет аварийная труба. При глубоком упуске произошел разрыв двух труб нижнего ряда. Ссылка на перегрев труб, связанная с упуском воды за счет их разрыва, не выдерживает критики, так как факел был мгновенно погашен водой, и большое количество пара охладило обмуровку топки, что привело к охлаждению труб до безопасной температуры.

Анализ эксплуатации котла показал, что она проводилась с грубыми нарушениями Правил технической эксплуатации со стороны обслуживающего персонала, т.е. к аварии привел пресловутый человеческий фактор.

Во-первых, плановая котлоочистка не проводилась в срок либо проводилась некачественно. Об этом свидетельствуют значительные отложения накипи на трубках. Кроме того, были нарушены сроки между котлоочистками.

Во-вторых, при эксплуатации котла имели место нарушения водного режима. О нарушении водного режима котла свидетельствует наличие твердой накипи на поверхностях нагрева. Согласно [2] образование твердой накипи на поверхностях нагрева котлов в нормальных условиях эксплуатации, т.е. при соблюдении водного режима, исключается. Согласно записям в журнале водоконтроля котел левого борта эксплуатировался 68 % времени при щелочном числе ниже нормы и 28 % времени с нарушением режима продувания. Котел правого борта эксплуатировался 38 % времени при щелочном числе ниже

нормы и 29 % времени с нарушением режима продувания. Ответственность за это несет третий механик.

В-третьих, имели место упуски воды на вахте третьего механика при проведении нижнего продувания 7 ноября, третий механик самостоятельно остановил главные паровые машины и турбогенератор в связи с упуском воды в обоих котлах (левого борта и правого борта). Котлы были немедленно запитаны водой.

В-четвертых, котлы систематически перегружались.

Таким образом, можно заключить, что причинами выхода из строя котла левого борта явились следующие нарушения требований нормативных документов.

*Нарушение сроков котлоочисток* является нарушением Правил технической эксплуатации [1]. При этом следующие должностные лица нарушили свои обязанности:

- старший механик [1], [3];
- третий механик [3];
- второй механик [3];
- капитан [3];
- начальник МСС 5 [4].

Вследствие нарушения сроков котлоочисток образуется толстый слой накипи и шлама на водогрейных трубках, что могло привести к перегреву трубок и провисанию металла.

*Систематическое нарушение водного режима* является нарушением Правил технической эксплуатации [1]. При этом следующие должностные лица нарушили свои обязанности:

- старший механик [3];
- третий механик [3];
- второй механик [3].

Вследствие нарушения водного режима образуется толстый слой накипи и шлама на водогрейных трубках.

*Упуск воды* является нарушением Правил технической эксплуатации [1]. При этом следующие должностные лица нарушили свои обязанности:

- старший механик [3], [1];
- третий механик [3], [1];
- второй механик [3];
- капитан [3].

Упуск воды ведет к расстройству циркуляции воды в котле и как следствие к перегреву металла труб.

Это проявляется в нарушении вальцовки, провисании труб, возможно появление отдушин и свищей.

*Перегруз котла* является нарушением Правил технической эксплуатации [1]. При этом следующие должностные лица нарушили свои обязанности:

- старший механик [1];
- третий механик [3], [1];
- второй механик [3];
- капитан [3];
- начальник МСС [4].

Перегруз котла может привести к повышению температуры стенок трубок первого притопочного пучка выше допустимой, что приводит к расслоению пароводяной смеси и нарушению циркуляции. Это проявляется в нарушении вальцовки, провисании труб, возможно появление отдушин и свищей.

Вышеперечисленный комплекс является причиной выхода из строя котла левого борта. Вместе с тем следует заметить, что нарушение сроков котлоочистки при отсутствии нарушений водного режима, упуска воды и перегруза котла не влечет дефектов. Нарушение водного режима при небольших перерывах между котлоочистками также не влечет аварии. Упуск воды не зависит от других нарушений правил эксплуатации судовых паровых котлов и является следствием серьезной ошибки обслуживающего персонала и ведет к аварии котла.

Следует заметить, что перегруз котла допускается только в исключительных случаях по распоряжению капитана [3]. Систематический перегруз, отрицательное влияние которого усугубляется нарушением сроков котлоочисток и водного режима, приводит к аварии.

Все вышеприведенное в равной степени относится и к котлу правого борта.

Таким образом, можно заключить, что причиной выхода из строя котлов правого и левого борта на плавбазе «Армань» были нарушения обслуживающим персоналом своих обязанностей по эксплуатации судовых паровых котлов, т.е. сработал пресловутый человеческий фактор.

### Список литературы

1. Правила технической эксплуатации паровых котлов на судах флота рыбной промышленности СССР. – Л.: Транспорт, 1980.
2. Правила обслуживания паровых котлов на судах флота рыбной промышленности СССР. – М.: Пищ. пром-сть, 1966.
3. Устав службы на судах рыбопромыслового флота Российской Федерации. - <http://www.zakonprost.ru/content/base/part/145409>.
4. Типовое положение о механико-судовой службе производственного объединения рыбной промышленности. – Л.: Гипрорыбфлот, 1979.
5. Орехов И.Г. Аварии судовых котельных установок. – М.: Транспорт, 1970. – 180 с.

**Сведения об авторе:** Соболенко Анатолий Николаевич,  
доктор технических наук, профессор, e-mail: sobolenko\_a@mail.ru.