

ТЕПЛОВАЯ НАПРЯЖЕННОСТЬ КРЫШЕК ЦИЛИНДРОВ ДВИГАТЕЛЕЙ, КОНВЕРТИРУЕМЫХ В СУДОВЫЕ

А. А. Ивнев¹, В. А. Жуков², Ю. Е. Хрящев¹, А. И. Яманин¹

¹ *Ярославский государственный технический университет,
Ярославль, Российская Федерация*

² *Государственный университет морского и речного флота
им. адмирала С. О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация*

Проанализированы особенности теплового нагружения крышек цилиндров транспортных дизелей при их конвертировании в судовые. В качестве перспективных для использования в составе судовых энергетических установок предложены двигатели ряда ЧН14/14 производства Ярославского моторного завода. Особенностью конструкции данных двигателей являются индивидуальные четырехклапанные головки цилиндров, имеющие сложную геометрическую форму. Конвертация автомобильных двигателей, головки цилиндров которых изготавливались из алюминиевых сплавов, в судовые сопровождается увеличением степени их форсированности. Головки цилиндров в процессе эксплуатации испытывают значительные тепловые и механические нагрузки, что вызывает необходимость повышенных требований к материалам головок цилиндров. Рациональный выбор материала головки цилиндров представляет собой одну из важнейших задач, решаемых при модернизации и форсировании двигателей. Опыт эксплуатации судовых дизелей свидетельствует, что для обеспечения требуемой надежности при длительном воздействии повышенных температур, обусловленных форсированием, необходим выбор чугуна в качестве конструкционного материала. Разработана трехмерная модель головки цилиндров. При выполнении расчетов обоснованы граничные условия с учетом локального характера распределения тепловых и механических воздействий на головку цилиндров дизеля. В результате численного моделирования определены и проанализированы напряженно деформированные состояния головок цилиндров, изготовленных из высокопрочного чугуна, ковкого чугуна и чугуна с вермикулярным графитом. Доказана предпочтительность применения чугунов с вермикулярным графитом, обладающих удовлетворительными литейными и физико-механическими свойствами. К преимуществам применения чугунов с вермикулярным графитом следует отнести снижение температуры головки цилиндров в области межклапанной перемычки. Доказана возможность повышения мощности двигателя с 330 до 560 кВт при замене алюминиевых сплавов чугунами с вермикулярным графитом для изготовления головок цилиндров.

Ключевые слова: цилиндр, граничные условия, уравнения подобия, коэффициент теплоотдачи, поле температур, эквивалентные напряжения, деформации.

Для цитирования: *Ивнев А. А., Жуков В. А., Хрящев Ю. Е., Яманин А. И.* Тепловая напряженность крышек цилиндров двигателей, конвертируемых в судовые // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Морская техника и технология. 2021. № 2. С. 55–64. DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-55-64.

Введение

В настоящее время является востребованным и широко практикуется конвертирование в судовые (главные и вспомогательные) двигатели освоенных в серийном производстве и хорошо зарекомендовавших себя в эксплуатации тяжелых автомобильных дизелей (например, типа ЧН14/14). Актуальность подобных мероприятий обуславливается также и необходимостью решения задачи импортозамещения: в России функционируют около десяти предприятий [1], продукция которых потенциально способна покрывать весь диапазон мощностей главных и вспомогательных судовых дизелей. В работе [1] выдвинут тезис о необходимости выпуска двигателей широкого назначения, имеющих как судовые, так и несудовые модификации. В связи со спецификой работы судового дизеля в конструкцию конвертируемого двигателя должны быть внесены изменения: настройка системы наддува, установка контура охлаждения забортной водой, обеспечение длительной прочности теплонапряженных корпусных деталей при увеличе-

нии среднего эффективного давления и др. [2, 3]. В последнем случае их температуры могут достигать значений, при которых начинают ухудшаться механические свойства конструкционных материалов. Тепловые (главным образом) нагрузки ограничивают ресурс двигателя, а неравномерность температурного поля в совокупности с высокими значениями температур и малоцикловым характером теплового нагружения приводит к появлению термических разрушений [4, 5]. С целью предотвращения такого рода разрушений модернизируются методы исследования процессов теплообмена в двигателях внутреннего сгорания [6, 7], оценки теплонапряженного состояния деталей цилиндропоршневой группы [8, 9], рассматриваются возможности использования материалов, обладающих повышенными прочностными свойствами [10], и применения теплозащитных покрытий [11, 12].

В целях обеспечения длительной прочности головок цилиндров весьма вероятно их выполнение из чугуна вместо алюминиевых сплавов. При этом необходимо обоснование марки чугуна с учетом его литейных, теплофизических и других свойств. Применение чугуна может способствовать повышению уровня форсирования двигателя и, таким образом, расширению области его применения в наземных транспортных и стационарных установках.

Цель настоящей работы – оценка теплового и напряженно-деформированного состояния литой чугунной крышки цилиндров двигателя, конвертируемого в судовой, при его одновременном форсировании; обоснование марки чугуна.

Методы и материалы исследования

Поставленную задачу решали применительно к крышкам цилиндров автомобильных дизелей типа ЧН14/14 ($N_e = 330$ кВт при 1 900 1/мин), поскольку имеется опыт удачных попыток их конвертирования в судовые [13] и сохраняются перспективы расширения использования модернизированных автомобильных и тракторных двигателей в составе судовых энергетических установок [14, 15]. Одновременно решали задачу возможности форсирования двигателя до $N_e = 560$ кВт за счет повышения давления наддува.

Трехмерная модель крышки цилиндра приведена на рис. 1.

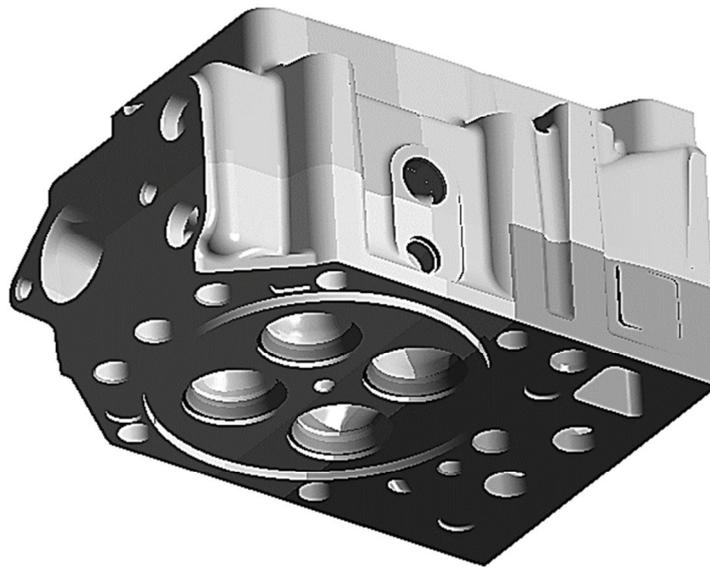


Рис. 1. Трехмерная модель крышки цилиндра дизеля 8ЧН14/14

При расчетах температурных полей сложность представляет определение граничных условий (в нашем случае III рода) теплообмена на поверхности огневого днища, обращенной к цилиндру, и в полостях системы охлаждения. Известно, что в обоих случаях имеет место локальный характер распределения значений коэффициента конвективной теплоотдачи и температур рабочего тела или охлаждающей жидкости [16].

Поскольку значения коэффициентов теплоотдачи на омываемой продуктами сгорания поверхности огневого днища распределены неравномерно, произведен расчет их локальных значений. Функция $f(r)$ распределения локальных значений коэффициента теплоотдачи по радиусу огневого днища описана уравнением Вошни:

$$f(r) = A + (B - A) \frac{r}{R} + \left[1 - 2A + (B - A) \frac{r}{R} \right] \left[4 \left(\frac{r}{R} \right)^t - \left(\frac{r}{R} \right)^t \right]^{2p},$$

где r – текущее значение расстояния от центра крышки; R – радиус днища крышки; коэффициенты A и B определяются по полуэмпирическим зависимостям [17].

Локальные значения коэффициента α теплоотдачи определяются по формуле

$$\alpha(r) = \frac{\bar{\alpha} f(r)}{R} \left[\int_0^R f(r) dr \right]^{-1},$$

где $\bar{\alpha}$ – осредненное за время рабочего цикла значение коэффициента теплоотдачи.

С учетом принятых значений ($A = 0,5$; $B = 0,5$; $t = 1,5$; $p = 1,50$) и средней величины коэффициента теплоотдачи, равной $1\,017 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (определена при расчете рабочего цикла дизеля в среде приложения Diesel-RK), получено распределение коэффициента теплоотдачи по радиусу днища крышки (рис. 2).

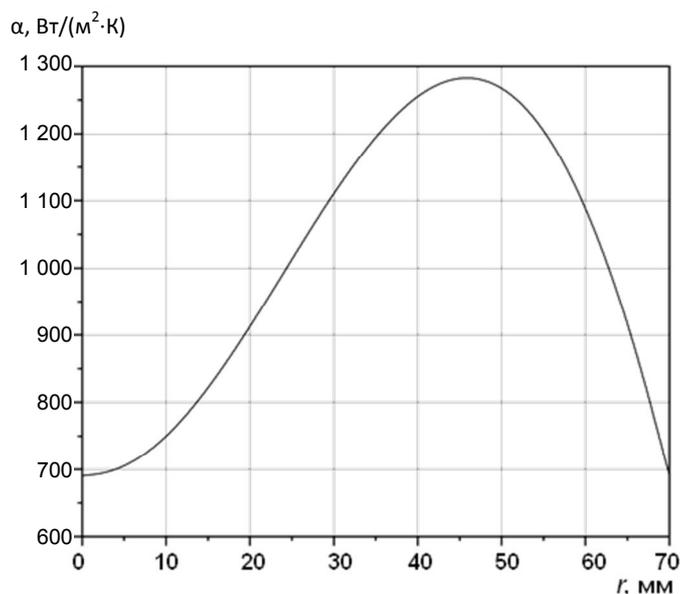


Рис. 2. Локальные значения коэффициента теплоотдачи от продуктов сгорания к днищу крышки

В целях определения граничных условий со стороны полости охлаждения крышки использованы полученные экспериментально зависимости для локальной теплоотдачи с их последующей математической обработкой методами теории подобия. Для охлаждаемых внутренних полостей головок структура уравнения подобия для режима вынужденной конвекции имеет вид [5]:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, x/d),$$

где Nu – число Нуссельта (безразмерный коэффициент теплоотдачи); Re – критерий Рейнольдса, зависящий от режима течения жидкости; Pr – критерий Прандтля, характеризующий соотношение вязкостных и инерционных тепловых свойств среды; x – расстояние от входного сечения канала; d – характерный геометрический размер системы (эквивалентный диаметр проходного сечения канала).

В нашем случае для расчета локальной теплоотдачи на охлаждаемой поверхности, в том числе и с механически обработанными каналами в межклапанных перемычках (рис. 3), использованы следующие уравнения подобия [18, 19] при угловом и осевом входе в канал охлаждающей жидкости соответственно:

$$\text{Nu} = 1,703 \text{Re}^m \text{Pr}^{0,43} (x/d)^{-1,62} \quad \text{и} \quad \text{Nu} = 1,443 \text{Re}^m \text{Pr}^{0,43} (x/d)^{-1,62},$$

где $m = 0,53 (x/d)^{0,165}$ – степень влияния скорости потока, зависящая от расстояния от входного сечения канала или полости.

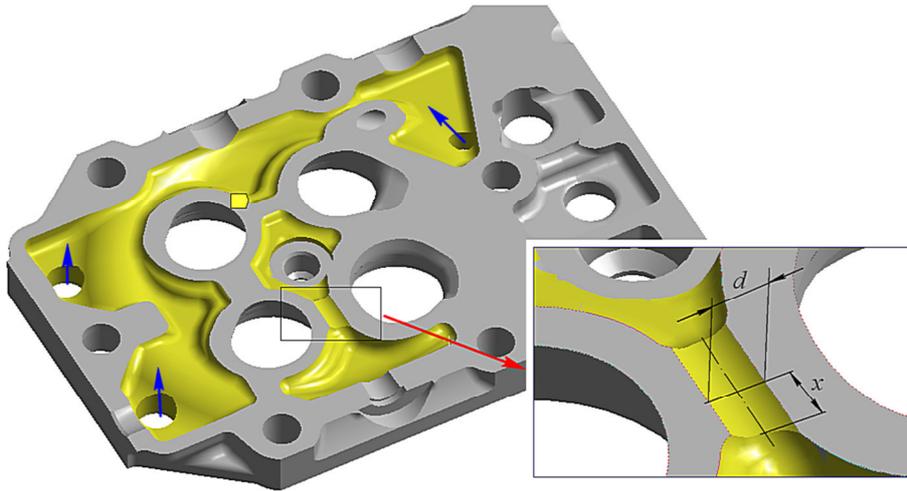


Рис. 3. Полость охлаждения крышки цилиндров

Коэффициент теплоотдачи α определяется из числа Нуссельта по выражению $\alpha = \text{Nu} \cdot \lambda_f / d$, где λ_f – коэффициент теплопроводности жидкости.

При принятых значениях средней температуры охлаждающей жидкости (80 °С), ее коэффициента теплопроводности (0,675 Вт/м·К), коэффициента кинематической вязкости ($0,365 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$), числа Прандтля (2,21) рассчитаны величины коэффициентов теплоотдачи; на поверхностях внутренней полости охлаждения крышки выделены участки поверхностей, в пределах которых значения этих коэффициентов считались условно одинаковыми (рис. 4, табл. 1).

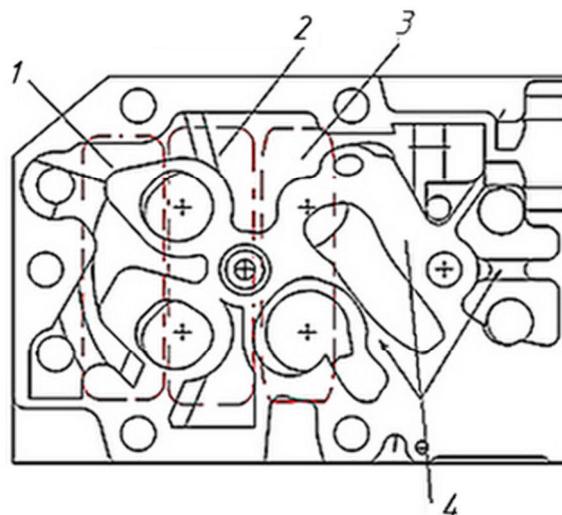


Рис. 4. Распределение значений коэффициента теплоотдачи на участках полости охлаждения крышки (1–4)

Граничные условия в полости охлаждения

Участок (см. рис. 4)	1	2	3	4
Коэффициент теплоотдачи, кВт/(м ² ·К)	22	15,5	12	6
Температура среды, К	353	353	353	353

Построение сетки конечных элементов производилось с учетом рекомендаций [20]. При расчете предполагалось, что крышка цилиндра выполнена из высокопрочного чугуна (ВЧ), ковкого чугуна (КЧ) или чугуна с вермикулярным графитом (ЧВГ), физико-механические свойства которых приведены в табл. 2.

Таблица 2

Механические и теплофизические свойства чугунов

Параметры	ВЧ	КЧ	ЧВГ
Модуль упругости, МПа	$1,7 \cdot 10^5$	$1,65 \cdot 10^5$	$1,71 \cdot 10^5$
Коэффициент Пуассона	0,275	0,260	0,275
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	35,9	37,2	45
Плотность, кг/м ³	7 130	7 300	7 370
Коэффициент линейного расширения, 1/°С	$1,12 \cdot 10^{-5}$	$1,30 \cdot 10^{-5}$	$1,12 \cdot 10^{-5}$

Результаты исследования

В ходе расчетов определяли поля температур и эквивалентные напряжения и деформации, обусловленные неравномерным температурным полем и закреплениями, а также газовыми силами для двух нагрузочных режимов работы: $N_e = 330$ кВт, $p_z = 16$ МПа и $N_e = 560$ кВт, $p_z = 19$ МПа. Некоторые из результатов представлены на рис. 5–7.

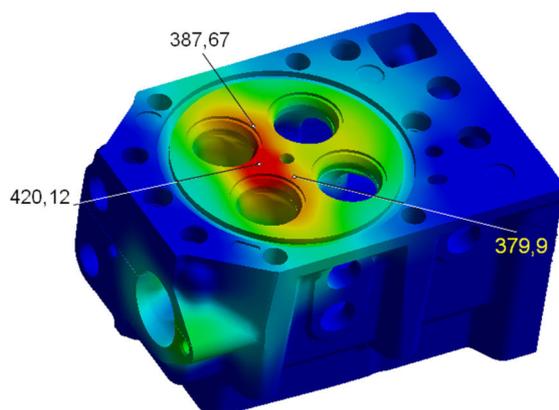


Рис. 5. Поле температур, °С, крышки дизеля 8ЧН14/14 ($N_e = 330$ кВт, $n = 1\,900$ 1/мин, КЧ)

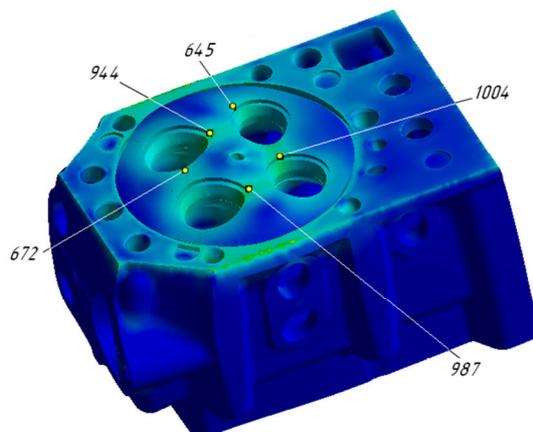


Рис. 6. Поле эквивалентных напряжений, МПа, крышки дизеля 8ЧН14/14 ($N_e = 330$ кВт, $n = 1\,900$ 1/мин, ВЧ)

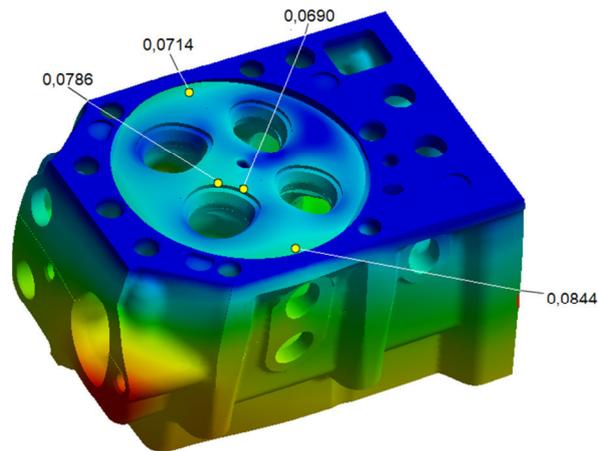


Рис. 7. Поле суммарных перемещений, мм, точек огневого дна крышки дизеля 8ЧН14/14 ($N_e = 330$ кВт, $n = 1\,900$ 1/мин, ВЧ)

Обращают на себя внимание значительные величины суммарных перемещений точек на поверхности дна крышки, обусловленных неравномерным температурным полем (рис. 7). Не исключено, что возникнет необходимость дополнительной механической обработки дна в области перемычек во избежание соударения с поршнем при нахождении последнего в области верхней мертвой точки.

Результаты расчетов подтверждают, что при одинаковой тепловой нагрузке максимальные температуры межклапанных перемычек крышки из ЧВГ существенно ниже, чем из КЧ и ВЧ, вследствие более высоких значений коэффициента теплопроводности. Пропорционально возрастают также максимальные напряжения и деформации (табл. 3).

Таблица 3

Результаты численного эксперимента

Результат	$N_e = 330$ кВт			$N_e = 560$ кВт		
	ВЧ	КЧ	ЧВГ	ВЧ	КЧ	ЧВГ
Максимальная температура в межклапанных перемычках T , °С	424	420	393	524	519	491
Максимальное эквивалентное напряжение σ_t , МПа	1 152	1 148	1 067	1 271	1 480	1 231
Деформация вследствие неравномерности температурного поля u_t , мм	0,095	0,106	0,087	0,121	0,134	0,112
Максимальное эквивалентное напряжение при совместном действии температурного поля и газовых сил $\sigma_{гр}$, МПа	1 146	1 250	1 061	1 467	1 002	1 172
Деформация вследствие неравномерности температурного поля при совместном действии температурного поля и газовых сил $u_{гр}$, мм	0,076	0,071	0,090	0,100	0,101	0,086

Таким образом, при конвертировании тяжелых автомобильных дизелей в судовые для головок цилиндров предпочтительнее использовать ЧВГ. При значительном уровне форсирования двигателя потребуется обеспечение прочности крышки за счет соответствующих термообработок или нанесения теплозащитных покрытий.

Заключение

Конвертирование автомобильных дизельных двигателей в судовые сопровождается повышением уровня их форсированности с неизбежным возрастанием тепловых и механических нагрузок на детали цилиндропоршневой группы.

Рациональный выбор материалов деталей цилиндропоршневой группы, и прежде всего головки цилиндров, – важнейшая задача обеспечения надежности дизельных двигателей. Для осуществления такого выбора необходима оценка теплонапряженного состояния деталей. В проведенных исследованиях для такой оценки использовались методы численного моделирования.

В результате проведенного исследования на основании выполненных расчетов установлено, что при конвертировании тяжелых автомобильных дизелей в судовые для головок цилин-

дров предпочтительнее использовать ЧВГ. При значительном уровне форсирования двигателя потребуется обеспечение прочности крышки за счет соответствующих термообработок или нанесения теплозащитных покрытий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безюков О. К., Жуков В. А. Состояние и перспективы судового двигателестроения в России // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Морская техника и технология. 2017. № 2. С. 40–53.
2. Курин М. С. Конвертация автотракторных ДВС в судовые модернизацией их системы газотурбинного наддува: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2006. 22 с.
3. Жуков В. А., Ратнов А. Е. Модернизация системы охлаждения дизеля 8ЧН14/14 для его использования в составе судовой энергетической установки // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. № 2. С. 59–64.
4. Чайнов Н. Д., Станкевич И. В., Исаев Е. В., Мильштейн Л. Г. Анализ теплового состояния блочных головок цилиндров // Двигателестроение. 1985. № 5. С. 7–9, 19.
5. Новенников А. Л. Теоретические аспекты, методы и пути улучшения теплового состояния охлаждаемых деталей поршневых двигателей: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М., 1993. 32 с.
6. Zhukov V. A., Zhelezniak A. A., Bezmennikova L. N., Erofeev V. L. Diagnosis of Thermal Processes in Motors of the Electrical Objects // Journal of Physics: Conference Series. 2017. N. 803 (1). P. 012184.
7. Zhukov V. A., Sherban S. A., Melnik O. V., Sokolov S. S., Kolesnichenko S. V. Improvement of Methods and Means of Thermal Control of Ship Power Plants // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019 (Saint-Petersburg, Moscow, 28–30 January 2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. P. 389–392.
8. Zhukov V., Melnik O., Logunov N., Chernyi S. Regulation and control in cooling systems of internal combustion engines // E3S Web Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019). EDP Sciences. 2019. Vol. 135. URL: <https://www.researchgate.net/journal/E3S-Web-of-Conferences-2267-1242> (дата обращения: 10.02.2021).
9. Zhukov V. A., Pulyaev A. A., Melnik O. V., Nyrkov A. P. Ensuring the Permissible Temperature State of Parts of the Cylinder-Piston Group of Forced Diesels // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019 (Saint-Petersburg, Moscow, 28–30 January 2019). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. P. 385–388.
10. Dean Pierce, Allen Haynes, Jeff Hughes, Ron Graves, Claus Daniel. High temperature materials for heavy duty diesel engines: Historical and future trends // Progress in Materials Science. 2019. Vol. 103. P. 109–179.
11. Taymaz I., Çakır K., Mimaroglu A. Experimental study of effective efficiency in a ceramic coated diesel engine // Surface and Coatings Technology. 2005. Vol. 200. Iss. 1-4. P. 1182–1185.
12. Taymaz I. The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 201. Iss. 9-11. P. 5249–5252.
13. Безюков О. К., Жуков В. А., Курин М. С., Прохоров О. Г. Опыт конвертации автотракторных двигателей в судовые // Безопасность водного транспорта: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 300-летию Санкт-Петербурга (Санкт-Петербург, 10–12 сентября 2003 г.). СПб.: Изд-во СПбГУВК, 2003. Т. 3. С. 121–125.
14. Жуков В. А., Курин М. С. Перспективы конвертации автомобильных двигателей в судовые в аспекте экологических нормативов // Актуальные проблемы современной науки: сб. тр. XI Междунар. конф. (Самара, 16–18 ноября 2010 г.). Самара: Изд-во СамГТУ, 2010. Ч. 3. Механика и машиностроение. С. 41–45.
15. Жуков В. А. Перспективы использования на водном транспорте газовых двигателей серии ЯМЗ-530 CNG // Сб. науч. тр. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адмирала С. О. Макарова. СПб.: Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. С. 183–187.
16. Кавтарадзе Р. З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001. 592 с.
17. Чайнов Н. Д., Мягков Л. Л., Маластовский Н. С. Методика расчета согласованных температурных полей крышки цилиндра с клапанами // Вестн. Москов. гос. техн. ун-та им. Н. Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2012. № 10. С. 82–91.
18. Новенников А. Л., Ивнев А. А. Исследование гидродинамики и теплообмена в каналах охлаждения головок цилиндров дизелей // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. 1989. № 11. С. 73–78.
19. Ивнев А. А. Улучшение теплового состояния головок цилиндров автомобильных дизелей за счет совершенствования их охлаждения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1991. 18 с.
20. Гальшиев Ю. В., Шабанов А. Ю., Макарин А. В. Оценка необходимой точности задания граничных условий теплового нагружения головки цилиндров двигателя внутреннего сгорания // Вестн. Гос. ун-та мор. и реч. флота им. адмирала С. О. Макарова. 2014. Вып. 3. С. 75–80.

Статья поступила в редакцию 23.03.2021

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Андреевич Ивнев – канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры двигателей внутреннего сгорания; Ярославский государственный технический университет; Россия, 150023, Ярославль; ivnevaa@ystu.ru.

Владимир Анатольевич Жуков – д-р техн. наук, доцент; зав. кафедрой теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания; Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; Россия, 198035, Санкт-Петербург; zhukovva@gumrf.ru.

Юрий Евгеньевич Хрящев – д-р техн. наук, доцент; профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания; Ярославский государственный технический университет; Россия, 150023, Ярославль; ivnevaa@ystu.ru.

Александр Иванович Яманин – д-р техн. наук, профессор; профессор кафедры двигателей внутреннего сгорания; Ярославский государственный технический университет; Россия, 150023, Ярославль; ivnevaa@ystu.ru.



THERMAL TENSION OF CYLINDER COVERS OF TRANSPORT DIESEL ENGINES CONVERTED TO MARINE DIESELS

A. A. Ivnev¹, V. A. Zhukov², Yu. E. Khryashchey¹, A. I. Yamanin¹

*¹ Yaroslavl State Technical University,
Yaroslavl, Russian Federation*

*² Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
Saint-Petersburg, Russian Federation*

Abstract. The article describes the characteristics of thermal loading of the cylinder covers of transport diesel engines during their conversion to marine diesels. The engines of the CHN14/14 type produced by the Yaroslavl Motor Plant are proposed as promising for use in marine power plants. A special feature of the engine design is the individual four-valve cylinder heads, which have a complex geometric shape. The conversion of automobile engines, the cylinder heads of which were made of aluminum alloys, to marine ones is accompanied by an increase in the degree of their acceleration. The cylinder heads in operation experience significant thermal and mechanical loads, which causes the need for increased requirements for the materials of the cylinder heads. The rational choice of the cylinder head material is one of the most important tasks to be solved when upgrading and boosting engines. Experience in the operation of marine diesel engines shows that in order to ensure the required reliability under prolonged exposure to elevated temperatures due to forcing, it is necessary to choose cast iron as a structural material. A three-dimensional model of the cylinder head is developed. When performing the calculations, the boundary conditions are justified, taking into account the local nature of the distribution of thermal and mechanical effects on the diesel cylinder head. As a result of numerical modeling, the stress-strain states of cylinder heads made of high-strength cast iron, ductile iron and cast iron with vermicular graphite are determined and analyzed. There has been proved the preference for using cast irons with vermicular graphite, which have satisfactory casting and physical and mechanical properties. The advantages of using cast iron with vermicular graphite include a decrease in the temperature of the cylinder head in the area of the inter-valve bridge. The possibility of increasing the engine power from 330 to 560 kW when replacing aluminum alloys with cast iron with vermicular graphite for the manufacture of cylinder heads is proved.

Key words: cylinder, boundary conditions, similarity equations, heat transfer coefficient, temperature field, equivalent stresses, deformations.

For citation: Ivnev A. A., Zhukov V. A., Khryashcheyv Yu. E., Yamanin A. I. Thermal tension of cylinder covers of transport diesel engines converted to marine diesels. *Vestnik of Astrakhan State Technical University. Series: Marine Engineering and Technologies*. 2021;2:55-64. (In Russ.) DOI: 10.24143/2073-1574-2021-2-55-64.

REFERENCES

1. Beziukov O. K., Zhukov V. A. Sostoianie i perspektivy sudovogo dvigatelestroeniia v Rossii [State and prospects of ship engine building in Russia]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2017, no. 2, pp. 40-53.
2. Kurin M. S. *Konvertatsiia avtotraktornykh DVS v sudovye modernizatsiei ikh sistemy gazoturbinnogo nad-duva: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Conversion of autotractor internal combustion engines into marine engines by modernizing their gas turbine pressurization system: diss. abstr. ... cand. tech. sci.]. Saint-Petersburg, 2006. 22 p.
3. Zhukov V. A., Ratnov A. E. Modernizatsiia sistemy okhlazhdeniia dizelia 8ChN14/14 dlia ego ispol'zovaniia v sostave sudovoi energeticheskoi ustanovki [Modernization of 8ChN14 / 14 diesel cooling system for using as part of ship power plant]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniia*, 2012, no. 2, pp. 59-64.
4. Chainov N. D., Stankevich I. V., Isaev E. V., Mil'shtein L. G. Analiz teplovogo sostoiianiia blochnykh golovok tsilindrov [Analysis of thermal state of block cylinder heads]. *Dvigatelestroenie*, 1985, no. 5, pp. 7-9, 19.
5. Novennikov A. L. *Teoreticheskie aspekty, metody i puti uluchsheniia teplovogo sostoiianiia okhlazhdaemykh detalei porshnevykh dvigatelei: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk* [Theoretical aspects, methods and ways of improving thermal state of cooled parts of piston engines: diss. abstr. ... doct. tech. sci.]. Moscow, 1993. 32 p.
6. Zhukov V. A., Zhelezniak A. A., Bezmennikova L. N., Erofeev V. L. Diagnosis of Thermal Processes in Motors of the Electrical Objects. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017, no. 803 (1), pp. 012184.
7. Zhukov V. A., Sherban S. A., Melnik O. V., Sokolov S. S., Kolesnichenko S. V. Improvement of Methods and Means of Thermal Control of Ship Power Plants. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019 (Saint-Petersburg, Moscow, 28–30 January 2019)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Pp. 389-392.
8. Zhukov V., Melnik O., Logunov N., Chernyi S. Regulation and control in cooling systems of internal combustion engines. *E3S Web Conferences. Innovative Technologies in Environmental Science and Education (ITESE-2019)*. EDP Sciences, 2019, vol. 135. Available at: <https://www.researchgate.net/journal/E3S-Web-of-Conferences-2267-1242> (accessed: 10.02.2021).
9. Zhukov V. A., Pulyaev A. A., Melnik O. V., Nyrkov A. P. Ensuring the Permissible Temperature State of Parts of the Cylinder-Piston Group of Forced Diesels. *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2019 (Saint-Petersburg, Moscow, 28–30 January 2019)*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. Pp. 385-388.
10. Dean Pierce, Allen Haynes, Jeff Hughes, Ron Graves, Claus Daniel. High temperature materials for heavy duty diesel engines: Historical and future trends. *Progress in Materials Science*, 2019, vol. 103, pp. 109-179.
11. Taymaz I., Çakır K., Mimaroglu A. Experimental study of effective efficiency in a ceramic coated diesel engine. *Surface and Coatings Technology*, 2005, vol. 200, iss. 1-4, pp. 1182-1185.
12. Taymaz I. The effect of thermal barrier coatings on diesel engine performance. *Surface and Coatings Technology*, 2007, vol. 201, iss. 9-11, pp. 5249-5252.
13. Beziukov O. K., Zhukov V. A., Kurin M. S., Prokhorov O. G. Opyt konvertatsii avtotraktornykh dvigatelei v sudovye. Bezopasnost' vodnogo transporta [Experience in converting automotive engines into marine engines. Water transport safety]. *Sbornik trudov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, posviashchennoi 300-letiiu Sankt-Peterburga (Sankt-Peterburg, 10–12 sentiabria 2003 g.)*. Saint-Petersburg, Izd-vo SPbGUVK, 2003. Vol. 3. Pp. 121-125.
14. Zhukov V. A., Kurin M. S. Perspektivy konvertatsii avtomobil'nykh dvigatelei v sudovye v aspekte ekologicheskikh normativov. Aktual'nye problemy sovremennoi nauki [Prospects for converting automobile engines into marine ones by environmental standards. Actual problems of modern science]. *Sbornik trudov XI Mezhdunarodnoi konferentsii (Samara, 16–18 noiabria 2010 g.)*. Samara, Izd-vo SamGTU, 2010. Part 3. Mekhanika i mashinostroenie. Pp. 41-45.
15. Zhukov V. A. Perspektivy ispol'zovaniia na vodnom transporte gazovykh dvigatelei serii IaMZ-530 CNG [Prospects for using gas engines of YaMZ-530 CNG series on water transport]. *Sbornik nauchnykh trudov Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*. Saint-Petersburg, Izd-vo GUMRF im. adm. S. O. Makarova, 2017. Pp. 183-187.
16. Kavtaradze R. Z. *Lokal'nyi teploobmen v porshnevykh dvigateliakh* [Local heat exchange in piston engines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 2001. 592 p.
17. Chainov N. D., Miagkov L. L., Malastovskii N. S. Metodika rascheta soglasovannykh temperaturnykh polei kryshki tsilindra s klapanami [Methodology for calculating coordinated temperature fields of cylinder head with valves]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2012, no. 10, pp. 82-91.

18. Novennikov A. L., Ivnev A. A. Issledovanie gidrodinamiki i teploobmena v kanalakh okhlazhdeniia golovok tsilindrov dizelei [Research of hydrodynamics and heat exchange in cooling channels of diesel cylinder heads]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie*, 1989, no. 11, pp. 73-78.

19. Ivnev A. A. *Uluchshenie teplovogo sostoianiia golovok tsilindrov avtomobil'nykh dizelei za schet sovershenstvovaniia ikh okhlazhdeniia: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the thermal state of the cylinder heads of automobile diesel engines by improving their cooling: diss. abstr. ... cand. tech. sci.]. Moscow, 1991. 18 p.

20. Galyshev Iu. V., Shabanov A. Iu., Makarin A. V. Otsenka neobkhodimoi tochnosti zadaniia granichnykh uslovii teplovogo nagruzheniia golovki tsilindrov dvigatel'ia vnutrennego sgoraniia [Assessment of required accuracy of setting boundary conditions for thermal loading of cylinder head of internal combustion engine]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova*, 2014, iss. 3, pp. 75-80.

The article submitted to the editors 23.03.2021

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Alexander A. Ivnev – Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Internal Combustion Engines; Yaroslavl State Technical University; Russia, 150023, Yaroslavl; ivnevaa@ystu.ru.

Vladimir A. Zhukov – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Head of the Department of Theory and Structure of Ship Internal Combustion Engines; Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; Russia, 198035, Saint-Petersburg; zhukovva@gumrf.ru.

Yuriy E. Khryashcheyev – Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor; Professor of the Department of Internal Combustion Engines; Yaroslavl State Technical University; Russia, 150023, Yaroslavl; ivnevaa@ystu.ru.

Alexander I. Yamanin – Doctor of Technical Sciences, Professor; Professor of the Department of Internal Combustion Engines; Yaroslavl State Technical University; Russia, 150023, Yaroslavl; ivnevaa@ystu.ru.

