

# МЕТОД ОЦЕНКИ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРА ДВИГАТЕЛЯ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ ЕГО ФОРСИРОВАНИИ

д.т.н. Васильев А.В., к.т.н. Ларцев А.М., д.т.н. Федянов Е.А.

Волгоградский государственный технический университет

tig@vstu.ru

Дизели воздушного охлаждения имеют более низкие, чем дизели с жидкостным охлаждением, значения среднего эффективного давления. Это обусловлено меньшей жесткостью корпусных деталей дизелей с воздушным охлаждением и сложностью поддержания в допустимых пределах температур деталей их цилиндропоршневой группы при повышении мощности. Наиболее теплонапряженными элементами в конструкции дизеля воздушного охлаждения являются головки цилиндров. При форсировании дизеля наддувом возникает вопрос о возможных пределах повышения давления наддува и требуемой глубине охлаждения наддувочного воздуха, при которых температуры головок цилиндров не превышают допустимых пределов. Прогнозный расчет при различных уровнях форсирования полей температур в головках цилиндров путем решения уравнения теплопроводности численными методами сталкивается с проблемой определения с достаточной точностью граничных условий, в первую очередь со стороны охлаждающего воздуха.

Для дизелей воздушного охлаждения, находящихся или подготавливаемых к производству, как правило, проводят термометрирование головок цилиндров, определяя, в том числе, значения температур на поверхности днища головки в наиболее теплонапряженных зонах. Предложен метод оценки изменения теплового состояния головки цилиндра дизеля воздушного охлаждения при наддуве, основанный на использовании данных испытаний и термометрирования дизеля с исходным уровнем форсирования. Метод позволяет установить возможные пределы форсирования при различных регулировках дизеля. Эффективность метода подтверждена примером расчета для тракторного дизеля 8ЧВН15/16. Сравнение результатов расчетного определения значений максимальной температуры днища головки с экспериментальными данными свидетельствует о том, что эти значения различаются не более чем на 1,8%. Предлагаемый метод правильно прогнозирует изменение теплового состояния головки цилиндров при форсировании дизеля воздушного охлаждения наддувом и может быть использован в инженерной практике для оценки возможных пределов форсирования таких дизелей, выбора регулировок топливоподачи и параметров охладителя наддувочного воздуха.

**Ключевые слова:** двигатель воздушного охлаждения; форсирование; головка цилиндров; тепловое состояние; метод оценки.

## Введение

Дизели воздушного охлаждения имеют, как правило, более низкие значения среднего эффективного давления, чем дизели жидкостного охлаждения той же размерности. Это обусловлено, во-первых, меньшей жесткостью корпусных деталей дизелей с воздушным охлаждением и, во-вторых, сложностью поддержания в допустимых пределах температур деталей их цилиндропоршневой группы при повышении мощности.

Наиболее теплонапряженными элементами в конструкции дизеля воздушного охлаждения являются, как показывает опыт испытаний и эксплуатации дизеля 8ЧВН 15/16, головки цилиндров. В головке цилиндров двигателя

воздушного охлаждения сложно обеспечить подвод охлаждающего воздуха в их наиболее теплонапряженные зоны, в частности в зону межклапанной перемычки. Кроме того, во внутренних каналах головки для охлаждающего воздуха невозможно вследствие конструктивных ограничений выполнить развитые поверхности теплоотвода. Меньшая интенсивность теплоотдачи в воздух по сравнению с теплоотдачей в капельную жидкость приводят не только к росту средней температуры головки в целом, но и к увеличению интервала изменения температуры и температурных градиентов в теле головки при изменении режима работы двигателя, а также при его форсировании.

При форсировании дизеля наддувом возникает вопрос о возможных пределах повышения давления наддува и требуемой глубине охлаждения наддувочного воздуха, при которых температуры головки цилиндров не превышают допустимых пределов [1]. Ответ на этот вопрос можно получить на основе расчета температурного поля в головке цилиндров с использованием соответствующих пакетов прикладных программ, однако для оценки возможных пределов форсирования конкретной модели дизеля надежность результатов таких расчетов может быть недостаточной, так как в большинстве случаев трудно определить с требуемой точностью граничные условия. В силу сказанного в производственных условиях чаще всего приходится прибегать к термометрированию.

**Целью исследования** является разработка метода оценки изменения теплового состояния головки цилиндра двигателя воздушного охлаждения.

### Методы исследования и результаты

Нами предлагается метод оценки изменения теплового состояния головки цилиндров дизеля воздушного охлаждения, позволяющий ограничиться экспериментальным определением температур на огневом днище головки цилиндров только на исходном уровне форсирования. В основе метода лежит достаточно очевидное утверждение о том, что термические сопротивления теплопроводности собственно головки цилиндров и теплоотдачи в окружающую среду остаются при форсировании двигателя практически неизменными. Таким образом, при форсировании температурное поле в головке меняется только в результате изменения теплового потока в днище головки и термического сопротивления теплоотдачи на поверхностях камеры сгорания.

Тепловой поток, передаваемый от рабочего тела в цилиндре к охлаждающему воздуху, можно выразить следующим образом [2]:

$$Q_w = \frac{T - T_0}{\frac{1}{\alpha_k \cdot F_d} + R_\lambda + R_{\alpha 0}}, \quad (1)$$

где  $T$  – средняя за период теплообмена температура газа в камере сгорания;  $T_0$  – температура охлаждающего воздуха;  $\alpha_k$  – среднее на расчетном диапазоне индикаторной диаграммы значение коэффициента теплоотдачи от

газа в днище головки цилиндра;  $F_d$  – площадь тепловоспринимающей поверхностей днища головки цилиндра;  $R_\lambda$  – термическое сопротивление теплопроводности тела головки цилиндра;  $R_{\alpha 0}$  – термическое сопротивление теплоотдачи от поверхности головки цилиндра в охлаждающий воздух.

Величину теплового потока  $Q_w$ , передаваемого от рабочего тела в цилиндре в охлаждающий воздух, для исходного уровня форсирования находим по формуле Ньютона-Рихмана, записанной для процесса теплоотдачи на поверхности огневого днища головки. При этом среднюю температуру газа  $T$  в цилиндре определяем путем обработки результатов индирования, а среднее по поверхности огневого днища головки значение температуры  $T_{\text{дпц}}$  находим как средневзвешенную величину измеренных на указанной поверхности температур. Расчет ведем, связывая с каждой точкой измерения площадь некоторого участка поверхности огневого днища головки. Значение коэффициента  $\alpha_k$  конвективной теплоотдачи вычисляем по модифицированной формуле Вошни [3]:

$$\alpha_k = 127,93 \frac{p^{0,8}}{T^{-0,53} \cdot D^{-0,2}} (C_1 \cdot c_m + B)^{0,8}, \quad (2)$$

где  $p$ ,  $T$  – температура и давление в цилиндре;  $D$  – диаметр цилиндра;  $C_1$ ,  $B$  – коэффициенты, определяемые параметрами воздушного заряда на впуске и параметрами цилиндропоршневой группы;  $c_m$  – средняя скорость поршня.

Возможность применения формулы Вошни (2) для дизелей воздушного охлаждения большой размерности была предварительно подтверждена применением ее для определения полного тепловыделения по данным индирования.

Зная на исходном уровне форсирования тепловой поток  $Q_w$ , температуру  $T$  газов в цилиндре и значение коэффициента  $\alpha_k$  конвективной теплоотдачи, из формулы (1) находим сумму термических сопротивлений  $R_{\text{ex}} = R_\lambda + R_{\alpha 0}$ .

Для оценки теплового состояния головки цилиндра на новом уровне форсирования необходимо знать, какие значения при этом примут  $T$  и  $\alpha_k$ . Эти значения могут быть найдены путем моделирования рабочего цикла двигателя.

Для двигателя 8ЧВН15/16, на котором проверялась эффективность рассматриваемого

метода, параметры рабочего тела в цилиндре при различных уровнях наддува могут быть с достаточной точностью найдены с помощью математической модели, разработанной в ВолГТУ профессором А.В. Васильевым [4, 5.] Рассчитывая с помощью математической модели на новом заданном уровне форсирования параметры двигателя и индикаторную диаграмму, определяем значение  $T$ , затем на основе расчетной индикаторной диаграммы вычисляем по формуле Вошни  $\alpha_k$  и далее по формуле (1) находим  $Q_w$ . Имея для нового уровня форсирования расчетные значения  $Q_w$ ,  $\alpha_k$  и  $T$ , вычисляем по формуле Ньютона-Рихмана новое значение  $T_{дтц}$ . В соответствии с распределением площади огневого днища головки по зонам измерения температур обратным пересчетом находим прогнозные значения в этих зонах.

Эффективность предложенного метода была проверена на основе результатов испытаний форсированного варианта дизеля 8ЧВН15/16 с различными типами турбокомпрессоров: Н2В «Holset», К-36, ТКР8,5С-7 [6, 7]. Параметры турбокомпрессоров приведены в табл. 1. Испытания проводились на моторном стенде и заключались в определении эффективных показателей дизеля и термометрировании головки цилиндра на режиме номинальной мощности. Расположение термопар на днище головки цилиндра приведено на рис. 1.

Суммарное значение термических сопротивлений теплопроводности головки цилиндров и теплоотдачи от нее в охлаждающий воздух было найдено по данным термометрирования дизеля 8ЧВН15/16 с номинальной мощностью 270 кВт, укомплектованного турбокомпрессором ТКР8,5С-7.

Для оценки достоверности разработанного метода прогнозные значения температур днища головки были определены по изложен-

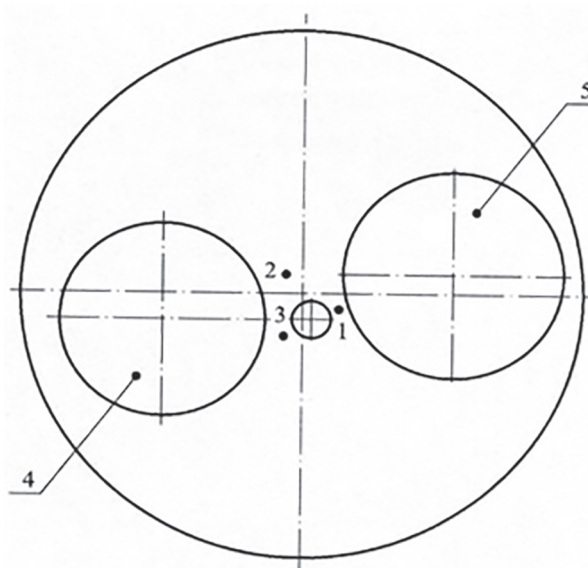


Рис. 1. Схема расположения термопар со стороны днища головки цилиндра: 1 –  $t_1$ ; 2 –  $t_2$ , 3 –  $t_3$ ; 4 – выпускной канал; 5 – впускной канал

ному выше способу для двигателя, укомплектованного различными турбокомпрессорами. При этом расчеты по математической модели выполнялись для каждого типа турбокомпрессора в отдельности с учетом особенностей их расходно-напорных характеристик.

В табл. 2 приведены экспериментальные и расчетные значения эффективной мощности  $N_e$ , подачи воздуха и его параметров после турбокомпрессора, коэффициента избытка воздуха, средней и максимальной температур днища головки. Максимальная температура на днище головки, согласно результатам термометрирования, наблюдается в точке 3 (рис. 1). Для каждого типа турбокомпрессора в табл. 2 в верхней строке приведены экспериментальные данные, а в нижней – расчетные. Значения максимальных температур днища головки цилиндров, найденные экспериментально и расчетным путем для вариантов с различны-

Таблица 1

Степень согласованности турбокомпрессоров и двигателя 8ЧВН15/16

Параметр	Турбокомпрессор		
	Н2В	К-36	ТКР8,5С-7
$\varpi_k$	2,01	1,91	1,93
$G_{в,к}$ кг/с	0,266	0,262	0,257
$\eta_k$	0,71	0,80	0,68
$\eta_{кмах}$	0,75	0,80	0,69

Таблица 2

Опытные и расчетные значения параметров двигателя 8ЧВН15/16 при использовании различных ТКР

ТКР	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$N_e$ , кВт	$G_b$ , кг/ч	$p_k$ , МПа	$T_k$ , °C	$\alpha$	$T_{дц}$ , °C	$T_{max}$ , °C
Н2В	1700	271	1918	0,1975	117,0	2,16	-	291,0
		271	1886	0,1975	117,0	2,13	197,3	290,6
К36	1700	264	1885	0,1886	107,5	2,16	-	281,0
		264	1839	0,1886	107,4	2,13	190,7	280,9
8,5С-7	1700	264	1853	0,1904	114,5	2,10	-	290,0
		264	1828	0,1905	114,5	2,11	193,3	284,8

ми турбокомпрессорами, нанесены на график (рис. 2).

Сравнение результатов расчетного определения значений максимальной температуры днища головки с экспериментальными данными свидетельствует об их хорошем соответствии. Разброс расчетных и экспериментальных значений не превышает 1,8 %. При этом расчет правильно отражает наблюдаемую в экспериментах зависимость максимальной температуры днища головки от параметров турбокомпрессоров. В частности, можно сделать вывод о том, что при форсировании до одной и той же мощности турбокомпрессорами с различными расходными характеристиками, максимальная температура днища головки может быть различной.

### Заключение

Таким образом, предлагаемый метод правильно прогнозирует изменение теплового состояния головки цилиндров при форсировании дизеля воздушного охлаждения наддувом и может быть использован в инженерной практике для оценки возможных пределов форсирования таких дизелей, выбора регулировок

топливоподачи и параметров охладителя наддувочного воздуха.

### Литература

1. Ларцев А.М. Оценка эффективных показателей двигателя воздушного охлаждения В-400 при его форсировании // Двигателестроение. 2014. № 1. С. 26–29.
2. Злотин Г.Н., Федянов А.Е. Теплотехника. Волгоград: ВолгГТУ, 2005. 339 с.
3. Кавтарадзе Р.З. Локальный теплообмен в поршневых двигателях. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. 472 с.
4. Васильев А.В., Григорьев Е.А., Дивинский Е.А. Повышение эффективности дизеля совершенствованием газораспределения // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2000. № 6. С. 20–22.
5. Васильев А.В., Дивинский Е.А. Исследование рабочего процесса дизеля 8ЧВН15/16 с силовой газовой турбиной // Двигателестроение. 2004. № 2. С. 15–17.
6. Ларцев А.М. Влияние типа турбокомпрессора на основные показатели двигателя воздушного охлаждения большой мощности при его форсировании // Известия ВолгГТУ, серия «Наземные транспортные системы». 2013. Вып. 7. № 21. С. 56–58.
7. Ларцев А.М. Особенности форсирования наддувом дизелей воздушного охлаждения большой размерности: монография. Волгоград: ВолгГТУ, 2015. 163 с.

### References

1. Lartsev A.M. Assessment of effective performance indicators of air-cooled engine V-400 when its boosting. *Dvigatelistroenie*. 2014. No 1, pp. 26-29 (In Russ.).
2. Zlotin G.N., Fedyanov A.E. *Teplotekhnika* [Thermal engineering]. Volgograd. VolgGTU Publ., 2005. 339 p.

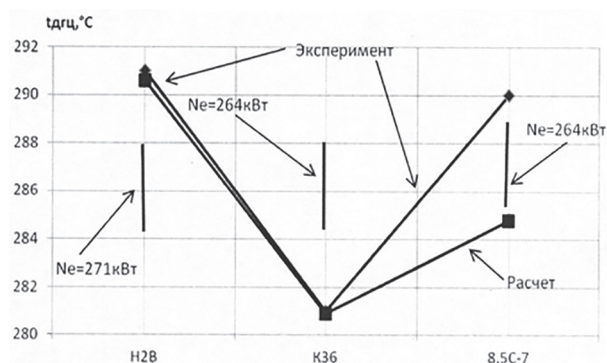


Рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения максимальных температур днища головки цилиндра в зависимости от используемого ТКР



3. Kavtaradze R.Z. *Lokal'nyy teploobmen v porshnevnykh dvigatelyakh* [Local heat transfer in piston engines]. Moscow, Izd-vo MGTU im. N.E. Bauman Publ., 2007. 472 p.
4. Vasil'ev A.V., Grigor'ev E.A., Divinskiy E.A. Improving the efficiency of a diesel engine by gas distribution improvement *Traktory i sel'skokhozyaystvennyye mashiny*. 2000. No 6, pp. 20-22 (In Russ.).
5. Vasil'ev A.V., Divinskiy E.A. Workflow research of diesel 8ChVN15/16 with power gas turbine. *Dvigatelsestroenie*. 2004. No 2, pp. 15-17 (In Russ.).
6. Lartsev A.M. Influence of the type of turbocharger on the basic parameters of air-cooling engine of high power when boosting. *Izvestiya VolgGTU, seriya "Nazemnye transportnye sistemy"*. 2013. Vyp. 7. No 21, pp. 56-58 (In Russ.).
7. Lartsev A.M. *Osobennosti forsirovaniya nadduvom dizeley vozdušnogo okhlazhdeniya bol'shoy razmernosti: monografiya* [Peculiarities of boosting by supercharge diesels with air-cooling of high dimensionality: a monograph]. Volgograd. VolgGTU Publ., 2015. 163 p.

## METHOD FOR ASSESSING THE CHANGES OF THE THERMAL STATE OF CYLINDER HEAD OF ENGINE WITH AIR-COOLING WHEN BOOSTING

Dr.Eng. **A.V. Vasilyev**, Ph.D. **A.M. Lartsev**, Dr. Eng. **E.A. Fedyanov**  
Volgograd State Technical University  
tig@vstu.ru

The diesel engines with air-cooling have lower than engines with liquid cooling values of the average effective pressure. This happens because of lower stiffness of body parts of air-cooled diesel engines and the difficulty of maintaining within acceptable limits the temperature of the parts of the cylinder group when increasing power. Most heat-stressed elements of the design of the air-cooled diesel are cylinders heads. When boosting diesel with supercharge the question arises about possible limits of increasing boost pressure and the required depth of the charge of air cooling, where the cylinder head temperatures do not exceed the permissible limits. Predictive calculation at various levels of boosting the temperature fields in the cylinders heads by solving the heat equation through numerical methods faces the problem of determining with sufficient accuracy of the boundary conditions, primarily from the side of the cooling air.

For air-cooled diesel engines ready or prepared for production is typically conducted the thermomentering of cylinders heads defining, inter alia, the temperature value at the head surface at the bottom in most heat-stressed zones. A method for estimating changes in the thermal state of the head cylinder of engine with air-cooling when boosting, based on using data of testing and thermomentering of diesel with initial level of boosting, is proposed. The method allows to set the limits of the possible boosting at various adjustments of diesel. The effectiveness of the method is confirmed by an example calculation for tractor diesel 8ChVN15/16. Comparison of the results of calculation of the maximum temperature value of cylinder head bottom with experimental data indicates that the values differ by no more than 1.8%. The proposed method correctly predicts the change of the thermal state of the cylinder head when boosting diesel with air-cooling by supercharge and can be used in engineering practice to assess the possible limits of boosting such diesels, choosing adjustments of fuel handling and parameters of coolant of charging air.

**Keywords:** air-cooled engine, boosting, cylinder head, thermal state, estimation method.