

МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 621.43

Ю. В. Галышев, А. Ю. Шабанов, П. С. Пацей, А. Б. Зайцев, В. В. Румянцев

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ ГАЗОВОЗДУШНЫХ КАНАЛОВ ГОЛОВКИ ЦИЛИНДРОВ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ПОРШНЕВОГО ДВС

UDC 621.43

Y. V. Galyshev, A. Y. Shabanov, P. S. Patsey, A. B. Zaytsev, V. V. Rummyantsev

DEFINITION AND SOLUTION OF THE TASK OF OPTIMIZING AIR-GAS CHANNELS OF THE CYLINDER HEAD OF HIGH-POWERED RECIPROCATING INTERNAL COMBUSTION ENGINES

Аннотация

Представлены результаты оптимизации формы впускных газозвудушных каналов головки цилиндров перспективного высокофорсированного двигателя ряда ЧН 15/17.5, разрабатываемого ОАО «Звезда». Снижение сопротивления каналов, по сравнению с базовым вариантом, составило 5...10 %. Решение задачи оптимизации головки цилиндра проводилось с применением современных методов моделирования рабочих процессов ДВС, процессов газодинамики, теплообмена и теплонапряженности деталей ДВС.

Ключевые слова:

дизельный двигатель, головка цилиндра, газозвудушные каналы, газодинамические потери, оптимизация формы каналов.

Abstract

The paper presents the results of optimizing the shape of air-gas inlet channels of the cylinder head of a CH N 15/17.5 high performance engine, developed by JSC «Zvezda». As compared to the base model, the reduction of channel resistance is 5...10 %. The optimization of the cylinder head has been carried out by using modern methods of modeling the working processes taking place in the internal combustion engine, the processes of gas dynamics, heat transfer and thermal loading in the ICE components

Key words:

diesel engine, cylinder head, air-gas channels, gas-dynamic losses, optimization of channel shape.

Решение задачи оптимизации газозвудушных каналов головки цилиндра требует проведения комплексного моделирования сложных газодинамических и теплообменных процессов в них. Основной целью оптимизации является выбор таких конструкций и геометрического профиля впускных и выпускных каналов, которые обеспечили бы:

– минимально возможные газодинамические потери при процессах истечения отработавших газов при выпуске из цилиндра и при затекании свежего заряда в камеру сгорания на такте впуска. При этом достигаются наилучшие показатели газообмена – максимальная величина коэффициента наполнения и минимальная величина коэффициента остаточных газов;

– необходимый, заданный исходя из условий смесеобразования тип закрутки рабочего тела на впуске, характеризуемый значением вихревого числа (для винтовых или тангенциальных впускных каналов);

– допустимый уровень температур и напряжений в критически важных зонах корпуса головки цилиндра с необходимыми коэффициентами запаса по напряжениям.

Задача оптимизации газоздушных каналов головки является многофакторной, поэтому следует выделить целевую функцию оптимизации и систему ограничений.

Для этого необходимо провести анализ основных возможных дефектов головок цилиндров и факторов, их вызывающих.

Основные дефекты головки цилиндров обычно сосредоточены в зоне ее нижней плиты. К их числу следует отнести:

– прогар головки в наиболее теплонапряженных зонах нижней плиты – межклапанных перемычках;

– выпадение или разрушение седел клапанов;

– прогар прокладки блока цилиндров и разрушение газового стыка головки цилиндра.

Все эти дефекты являются термомеханическими и вызваны либо перегревом локальных зон головки цилиндра, либо высокой неравномерностью температурной и (или) механической деформации детали.

Для предотвращения возможности появления таких дефектов необходимо выполнение следующих условий.

1. Вводится коэффициент запаса по температурам головки цилиндров K_T :

$$K_T = T_{\max}^* / T_{\max},$$

где T_{\max}^* – предельно допустимая температура головки цилиндра, определяемая пределом термостойкости материала, из которого изготовлена головка цилиндра; T_{\max} – максимальная темпе-

ратура головки цилиндра на расчетном режиме. Обычно она наблюдается в зоне межклапанной перемычки на нижней плите корпуса головки цилиндров.

Предполагается, что величина коэффициента запаса по температурам K_T не должна быть ниже 1,05.

2. Вводится коэффициент запаса по напряжениям K_σ :

$$K_\sigma = \sigma_b(T) / \sigma_{\max},$$

где $\sigma_b(T)$ – временный предел сопротивления материала головки цилиндра при рабочей температуре детали; σ_{\max} – максимальная интенсивность напряжений в теле детали.

Предполагается, что величина коэффициента запаса по напряжениям K_σ не должна быть ниже 1,20.

3. Ограничивается степень неравномерности температур на нижней плите головки цилиндра, как мероприятие, препятствующее температурному и термомеханическому короблению корпуса головки в зоне газового стыка. Четкие рекомендации по желаемому уровню равномерности отсутствуют, однако примем в качестве ограничения необходимость выполнения следующего условия:

$$2(T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min}) < 0,1,$$

где T_{\max} , T_{\min} – максимальная и минимальная температуры нижней плиты головки цилиндра соответственно.

Поскольку речь идет об оптимизации геометрической формы газоздушных каналов, необходимо ввести ограничения по параметрам газодинамики в них. Предлагается в качестве основной целевой функции принять усредненную за цикл величину газодинамических потерь в каналах, определяемую как

$$\Delta P = \sum_{i=1}^{n_t} (P_{\text{вх}}^i - P_{\text{вых}}^i) \Rightarrow \min,$$

где $P_{\text{вх}}^i$, $P_{\text{вых}}^i$ – давления на входе и вы-

ходе в канале соответственно; n_t – количество расчетных точек.

При этом вводятся следующие ограничения:

$$K_T > 1,05; \quad K_G > 1,2;$$

$$2(T_{\max} - T_{\min}) / (T_{\max} + T_{\min}) < 0,1;$$

$$\Omega > \Omega^*,$$

где Ω – вихревое число канала.

Поскольку задача оптимизации газоздушных каналов головки цилиндра является сугубо нелинейной и неформализуемой, отсутствует возможность получения многопараметрической регрессионной зависимости, к которой можно было бы применить стандартные методы нелинейной оптимизации (градиентов, наискорейшего спуска и т. п.). В такой ситуации решение задачи может проводиться только методом перебора вариантов.

Решение задачи оптимизации головки цилиндра возможно только с применением современных методов моделирования рабочих процессов, процессов газодинамики, теплообмена и теплонапряженности деталей ДВС. В данном исследовании была использована методика, разработанная на кафедре «Двигатели, автомобили и гусеничные машины» СПбГУ им. Петра Великого [1, 3–6].

Последовательность процедур решения задачи оптимизации строится по следующей технологической схеме (по принципу – от простого к сложному):

- анализ базового варианта конструкции, выявление степени ее соответствия установленным требованиям;
- выявление зон, оказывающих максимальное воздействие на газодинамические потери в каналах, проработка конструктивных вариантов каналов, уменьшающих или исключаящих их влияние;
- проведение моделирования процессов газодинамики в модифици-

рованных конструкциях газоздушных каналов, определение полей скоростей и давлений, потерь давления в них;

- выбор наилучшего варианта;
- проведение поверочного расчета температурного и напряженно-деформированного состояний оптимизированного варианта головки цилиндра для определения изменения пределов его работоспособности.

В качестве иллюстрации предложенной процедуры представлены результаты оптимизации формы впускных газоздушных каналов головки цилиндров перспективного высокофорсированного двигателя ряда ЧН 15/17.5, разрабатываемого ОАО «Звезда».

В плане решения данной задачи были рассмотрены 10 вариантов исполнения головки цилиндра с различными геометрическими профилями впускных газоздушных каналов.

На рис. 1 и 2 представлены начальный и итоговый варианты головки цилиндра, полученные в результате проведенной оптимизации.

При расчетах сопоставлялись потери давления в канале, характеризующие их аэродинамическое сопротивление. Предпочтительными признавались варианты, обеспечивающие минимальные потери на впуске-выпуске и, соответственно, наилучшие показатели газообмена двигателя.

Для итоговых вариантов головок цилиндров проводился поверочный расчет с целью определения изменения пределов их работоспособности, вносимых предлагаемой модификацией.

Анализ информации, полученной при решении задачи, позволяет указать основные источники газодинамических потерь во впускных и выпускных каналах. Ими являются наличие в полости впускного канала стержней клапанов, бобышек для установки направляющих втулок клапанов, сами направляющие втулки.

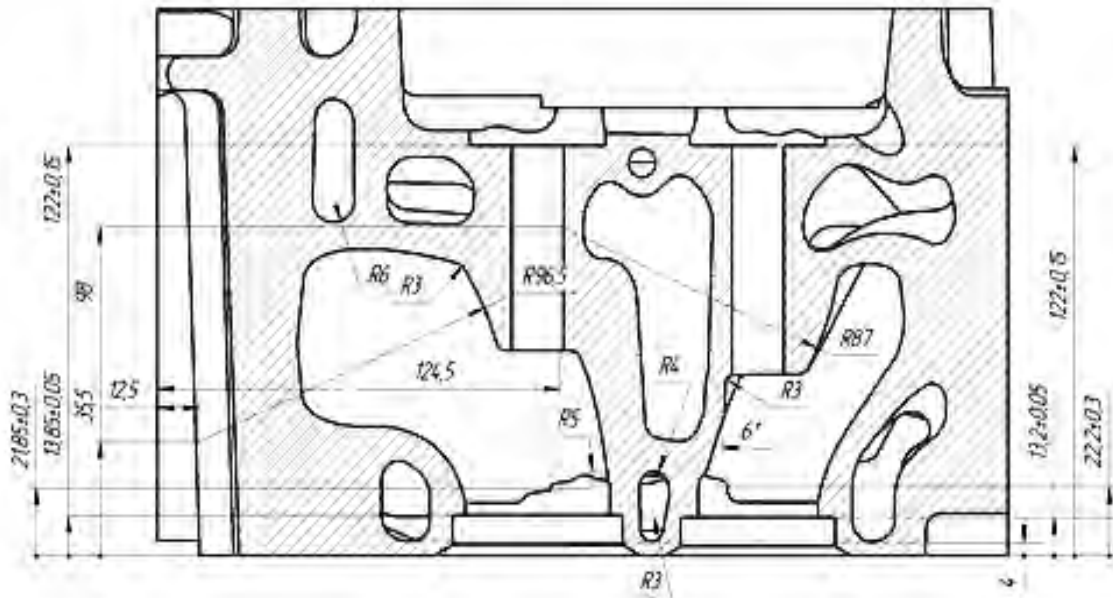


Рис. 1. Начальный вариант газоздушных каналов головки цилиндра дизеля ряда ЧН 15/17.5

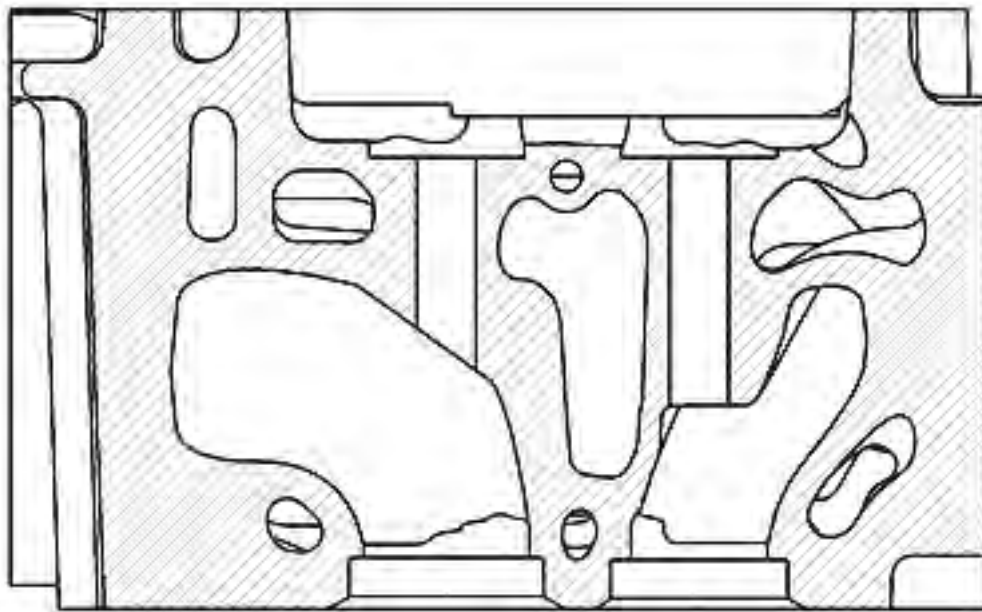


Рис. 2. Оптимизированный вариант газоздушных каналов головки цилиндра дизеля ряда ЧН 15/17.5

Излишняя турбулизация заряда при течении вблизи этих зон, наличие срывных течений формируют так называемые «турбулентные пробки», резко повышающие сопротивление каналов и

сужающие их реальное гидравлическое сечение. Кроме того, источниками дополнительного газодинамического сопротивления являются зоны с неравномерным изменением геометрического

профиля канала, зона резкого сужения проходного сечения у клапанных щелей. Таким образом, основной путь совершенствования газодинамической формы каналов – ликвидация или максимальное уменьшение зон излишней турбулизации и вихреобразования в газоздушных каналах. Как следует из эскиза, приведенного на рис. 2, в оптимизированном варианте канала применены именно эти решения – убраны бо-

бышки под направляющие втулки впускных клапанов, изменена геометрия стенок каналов. Данный вариант показал лучшие результаты по газодинамическому совершенству каналов. Снижение среднего сопротивления таких каналов, по сравнению с базовым вариантом, составило 5...10 %. Результаты расчета величины газодинамических потерь в базовом и оптимизированном вариантах каналов отражены на рис. 3 и 4.

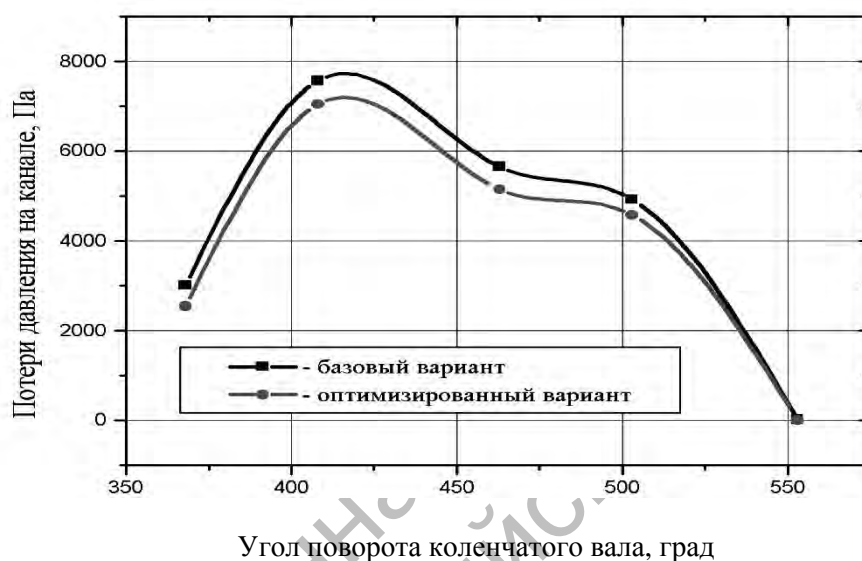


Рис. 3. Результаты расчета газодинамических потерь во впускном канале ГЦД ряда ЧН 15/17.5, режим $n = 2250$ об/мин

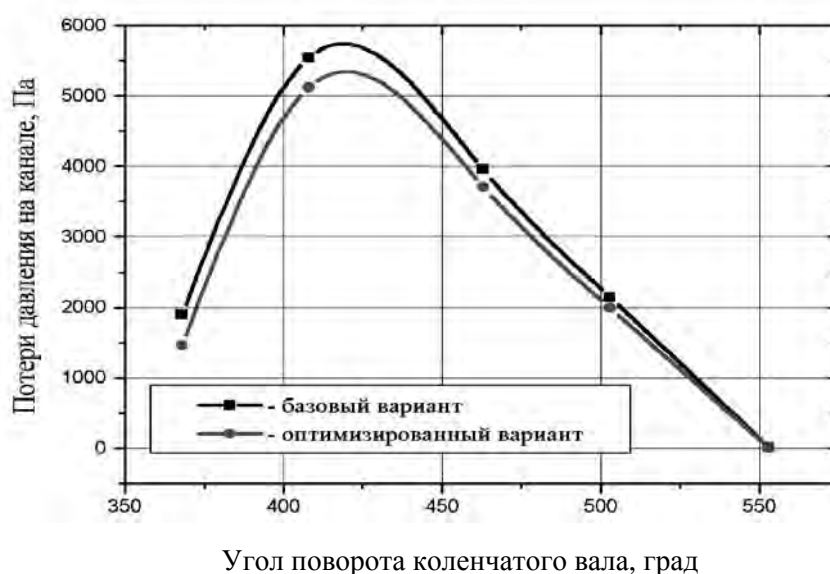


Рис. 4. Результаты расчета газодинамических потерь во впускном канале ГЦД ряда ЧН 15/17.5, режим $n = 1500$ об/мин

Следует отметить, что подобное решение подходит только для впускных каналов. Полное отсутствие бобышек для направляющей втулки выпускного клапана приводит к существенному повышению его температуры, что является

недопустимым. Принятое решение позволяет улучшить качество наполнения и очистки цилиндров, при этом выполняются условия по сохранению работоспособности узла головки цилиндра (рис. 5).

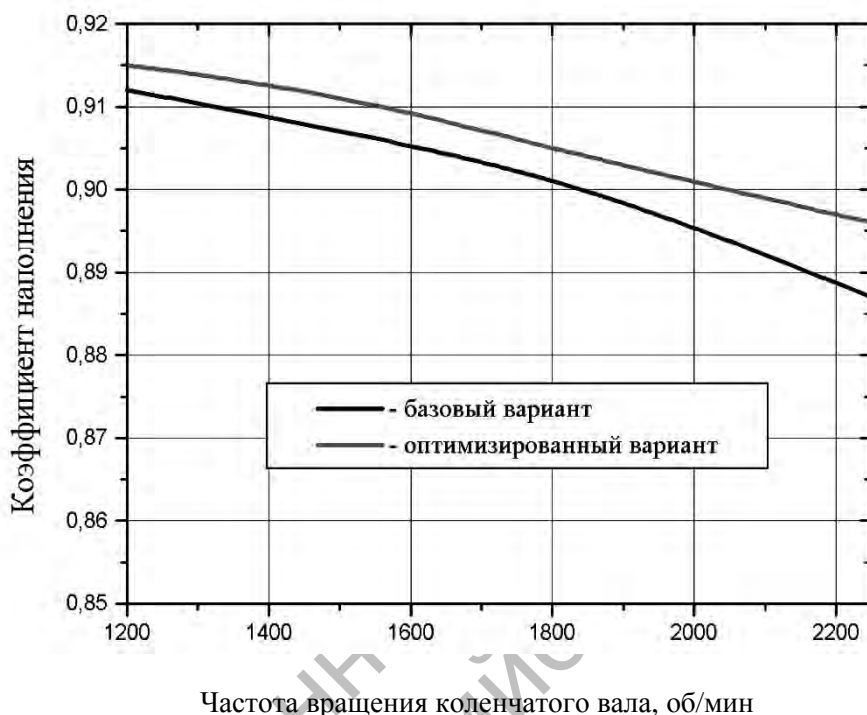


Рис. 5. Результаты расчета коэффициентов наполнения в базовом и оптимизированном вариантах ГЦД дизеля ряда ЧН 15/17,5

Поверочный расчет теплонапряженного состояния базового и модифицированных вариантов головок цилиндров показал, что изменение геометрической формы каналов («выглаживание» поверхности каналов, работа по улучшению формы бобышек под направляющие втулки и т. д.) в целом несущественно влияет на общий уровень температурного и напряженно-деформированного состояний головки.

Таким образом, современные методы моделирования процессов в ДВС позволяют значительно ускорить поиск эффективных конструктивных решений для высокофорсированных поршневых двигателей.

Работа выполнена в соответствии с государственным контрактом 02.G25.31.0094 на выполнение работ по теме «Разработка технологии проектирования и организация производства головок цилиндров дизельных и газопоршневых двигателей нового поколения» в рамках реализации постановления Правительства Российской Федерации от 9.04.2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Теория рабочих процессов в ДВС. Расчет рабочего цикла и газообмена в ДВС : учеб. пособие / Ю. В. Галышев [и др.]. – СПб. : Политехн. ун-т, 2013. – 196 с.
2. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов [и др.] ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – М. : Машиностроение, 1984. – 398 с.
3. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС. Алгоритмы прикладных программ / Р. М. Петриченко [и др.] ; под общ. ред. Р. М. Петриченко. – Л. : Машиностроение, 1990. – 328 с.
4. **Абызов, О. В.** Численное исследование гидродинамики и теплообмена в полости охлаждения головки цилиндра дизеля / О. В. Абызов, Ю. В. Галышев, А. Ю. Шабанов // Двигателестроение. – 2014. – № 2. – С. 8–10.
5. Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания / Ю. В. Галышев [и др.] // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. – 2014. – № 2 (195). – С. 58–64.
6. **Галышев, Ю. В.** Оценка необходимой точности задания граничных условий головки цилиндров двигателя внутреннего сгорания / Ю. В. Галышев, А. Ю. Шабанов, А. С. Макарин // Вестн. ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. – № 3. – С. 75–81.

Статья сдана в редакцию 4 декабря 2015 года

Юрий Витальевич Галышев, д-р техн. наук, доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: galyshev57@yandex.ru.

Александр Юрьевич Шабанов, канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: aush2003@mail.ru.

Павел Сергеевич Пацей, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: 2pashtet@gmail.com.

Алексей Борисович Зайцев, канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: absaytsev@mail.ru.

Виктор Валентинович Румянцев, канд. техн. наук, доц., Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. E-mail: rum.DVS@yandex.ru.

Yury Vitalyevich Galyshev, DSc (Engineering), Associate Prof., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: galyshev57@yandex.ru.

Aleksandr Yuryevich Shabanov, PhD (Engineering), Associate Prof., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: aush2003@mail.ru.

Pavel Sergeevich Patsey, PHD student, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: 2pashtet@gmail.com.

Aleksey Borisovich Zaytsev, PhD (Engineering), Associate Prof., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: absaytsev@mail.ru.

Viktor Valentinovich Rumyantsev, PhD (Engineering), Associate Prof., Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. E-mail: rum.DVS@yandex.ru.