

DOI 10.5862/JEST.231.5

УДК 621.43.016.4

Ю.В. Галышев, А.Б. Зайцев, Д.Г. Алексеев

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПОЛОСТЯХ ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ

Yu.V. Galyshev, A.B. Zaytsev, Dm.G. Alekseyeff

THE STUDY OF HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN THE COOLING CAVITIES OF HIGH-POWERED DIESEL ENGINE

В статье представлены результаты исследования с применением численного моделирования гидродинамики и теплообмена в полостях жидкостного охлаждения головки цилиндра высокофорсированного дизеля. Полость охлаждения головки — ключевой элемент системы охлаждения, непосредственно в ней происходит процесс теплопередачи со стороны огневого днища камеры сгорания, клапанов, выпускного канала в охлаждающую жидкость. Использование комплекса современных программных средств позволило получить основные параметры движения жидкости и теплопередачи, а также обеспечило визуальную оценку картины течения, необходимую для определения проблемных мест. Применение разработанной методики позволило внести уточнение в определение температурного поля головки цилиндра и обеспечить как снижение максимальных температур, так и выравнивание температурного поля. Основной расчет проводился в программе Flow Simulation (COSMOSFloWorks), которая является составной частью комплекса SolidWorks.

ДИЗЕЛЬ; ГОЛОВКА ЦИЛИНДРА; СИСТЕМА ЖИДКОСТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ; МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В ДВС; ТЕМПЕРАТУРА.

The paper presents the results of the study of hydrodynamics and heat transfer in cavities in a liquid-cooled cylinder head of a high accelerated diesel engine using numerical simulation. Cylinder head cooling cavity is a key element of the cooling system, it directly takes into the process of heat transfer from the bottom of the combustion chamber, valves and the discharge passage into the coolant. Using a complex of the modern software allowed us to obtain the basic parameters of fluid motion and heat transfer, as well as provide a visual assessment of flow patterns to identify the problem areas. Application of the developed methods make it possible to clarify the definition of the temperature field of the cylinder head, and ensure the reduction of the maximal temperatures and the alignment of the temperature field. The basic calculation is carried out in the program Flow Simulation (COSMOSFloWorks), which is part of the complex SolidWorks.

DIESEL; CYLINDER HEAD; LIQUID COOLING SYSTEM; THE SIMULATION OF AN ENGINE PROCESSES; TEMPERATURE.

Одним из определяющих требований при конструировании новых и модернизации существующих двигателей внутреннего сгорания (ДВС) является обеспечение оптимального теплового состояния деталей. Величина теплового потока, поступающего в систему охлаждения (СО), снижается благодаря эффективной орга-

низации рабочего процесса, однако количество теплоты, подлежащей отводу от двигателя, по-прежнему остается на высоком уровне и составляет до 20–30 % от теплоты, подведенной в цикл [11].

Сроки разработки новых ДВС прогрессивно сокращаются; применение трудоемких и затратных экспериментальных методов как основы при



доводке двигателей не всегда оправданно. Исходя из существующей потребности развития вопроса разрабатываются и развиваются методики расчета процессов, происходящих в полостях СО. Крупные машиностроительные предприятия используют в своей работе возможности компьютерной техники [2, 12], в частности САПР технологии, автоматизируя процессы проектирования, конструирования и изготовления продукции. Широкий круг задач моделирования динамики жидкости и теплообмена в полостях ДВС, во многом определяющих его надежность, решается на этапе Computer Fluid Dynamics (CFD) – вычислительной гидродинамики. Для их решения используют как универсальные, так и специализированные пакеты программ, реализующие расчет систем дифференциальных уравнений в частных производных посредством метода конечных элементов (КЭ) [3, 4, 13].

Головка цилиндра дизеля (ГЦД) – одна из наиболее сложных и важных деталей, совершен-

ство конструкции и технологии изготовления которой во многом определяют возможность достижения современных показателей по уровню форсирования, экономичности и вредных выбросов, от которых в общем случае зависит надежность работы ДВС. Стабильная циркуляция по тракту охлаждения, равномерное распределение потоков и отсутствие зон рециркуляции создают оптимальный тепловой режим работы двигателя и исключают появление локальных теплонапряженных участков и зон парообразования. Актуальность работы связана с тем, что предлагаемые в ней мероприятия по обеспечению совершенствования работоспособности ДВС, которые требуют детального массива данных о температурном поле в ГЦД, будучи применены еще на стадии проектирования, существенно снижают вероятность возникновения тепловых дефектов.

Цель работы – совместное исследование процессов гидродинамики и теплообмена в ГЦД

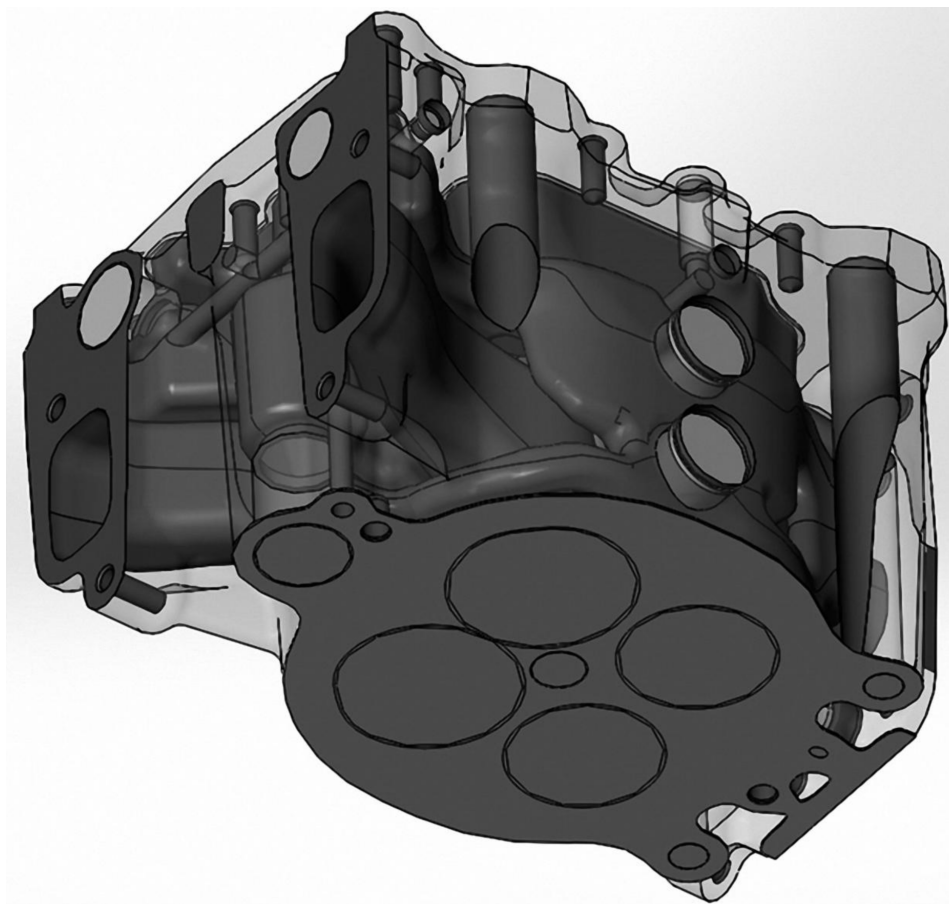


Рис. 1. Трехмерная модель головки цилиндра

(рис. 1) со стороны СО для обеспечения эффективного теплового режима высокофорсированного дизельного ДВС размерностью 15/17,5.

Для достижения цели необходимо выполнить следующее:

анализ существующих математических методов расчета теплообмена в полостях ГЦД;

исследование влияния места подачи охлаждающей жидкости (ОЖ) в головку на тепловой поток;

исследование влияния характеристик системы на движение хладагента по полостям СО и на интенсивность теплоотдачи.

В рамках работы проведена оптимизация теплового режима за счет организации движения ОЖ в СО с использованием модификации методологии Н.С. Маластовского [5] по численному моделированию гидродинамики жидкости в полостях ГЦД.

Важность исследования локальных свойств теплообмена при моделировании температурного состояния деталей ДВС хорошо изучена в трудах Б.С. Стефановского [6] и А.Л. Новенникова [7, 8]. Основное требование, предъявляемое к головке, — это качественное охлаждение стенок, образующих КС, особенно межклапанных перемычек, а также выпускного канала, поскольку тепловая напряженность в ГЦД всех высокофорсированных двигателей намного превосходит механические напряжения. Ключевыми термическими нагрузками, воздействующими на ГЦД, являются:

конвективный и радиационный тепловые потоки, исходящие от рабочего тела в цилиндре ДВС;

конвективные тепловые потоки со стороны впускных и выпускных газоздушных каналов (ГВК), в которых рабочее тело перемещается с высокими скоростями;

тепловые потоки, появляющиеся вследствие контактной теплоотдачи в сопряжениях «седло—фаска клапана»;

тепловые потоки, отводимые в полости охлаждения.

Существует широкий ряд эмпирических зависимостей, оценивающих интенсивность теплоотдачи в СО. Приведем некоторые [15] из них:

1. Уравнение В.М. Бузника, определяющее коэффициент теплоотдачи от гильзы к ОЖ,

$$Nu = 0,017 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0,18} \varepsilon_l, \quad (1)$$

где d_1 — диаметр теплоотдающей поверхности гильзы цилиндра; d_2 — наружный диаметр полости охлаждения.

2. Зависимость Т. Зоннекена [16] для определения коэффициента теплоотдачи от стенок гильз и головок в СО

$$\alpha_w = 300 + 1800 \sqrt{w}, \quad (2)$$

где w — средняя скорость течения ОЖ в каналах СО ДВС.

Однако подчеркивается нежелательность применения эмпирических зависимостей [14], поскольку для современного высокофорсированного ДВС форма полости СО имеет сложную пространственную структуру, а течение ОЖ отличается большими градиентами скоростей, сочетает зоны ускоренного и застойного течений. Использование подобных упрощенных моделей для описания процесса теплообмена возможно только на начальных, оценочных уровнях проектирования узла ГЦД. Таким образом, наилучшим и нередко единственным передовым подходом служит численное моделирование [9], в основе которого решаются уравнения сохранения массы, энергии и импульса. Они описываются общим дифференциальным уравнением для переменной Φ :

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\Phi) + S, \quad (3)$$

где Γ — общий коэффициент диффузии; S — дополнительное слагаемое источника

Для уточненного расчета полей температур и температурных напряжений единственно возможным выбором является использование методов численного моделирования процессов гидродинамики и теплообмена. Использование методов вычислительной гидродинамики следует считать основным и для определения условий теплового напряжения ГЦД, поскольку они определяют теплонапряженное состояние на 90–95 % [10]. Для моделирования головки выбран конструкторский пакет Solidworks, обеспечивающий разработку изделий любой степени сложности и назначения. В процессе работы создана методика комплексного исследования гидродинамики и теплообмена в полостях СО ДВС с применением компьютерного моделирования; она использована для расчета течения в



полостях охлаждения высокофорсированного дизельного двигателя.

Полость охлаждения ГЦД, выполняемой из высокопрочного чугуна, характеризуется сложной конфигурацией и в зависимости от способа подвода ОЖ имеет от одного до трех входных отверстий, а также от шести до восьми отверстий отбора. Поскольку поиск значений температур и тепловых потоков в полости СО ГЦД требует задания в качестве исходных данных величин тепловых потоков и температур деталей, априори неизвестных, то на каждом этапе расчета единственно возможным методом служит итерационная процедура расчета.

Модель полостей СО описывает объем вещества, заполняющего полости, (в данном случае — вода). На рис. 2 затемненной расцветкой показаны внутренние объемы, предназначенные для циркуляции ОЖ. Для моделирования течения

жидкости и передачи теплоты был выбран пакет Flow Simulation — мощный программный модуль CFD анализа в среде SolidWorks.

В этом же пакете осуществляется генерация сетки посредством метода кривизны совместно с процедурой, основыванной на методе Делано—Вороного, что позволяет получать наиболее адекватное решение на объектах преимущественно криволинейной формы. Сетка адаптируется к типу геометрии тела, которая впоследствии аппроксимируется конечными элементами в автоматическом режиме [1].

Исследование с применением комплекса программных средств проводилось для четырех конструктивных вариантов полости и трех режимов расхода насосом ОЖ. Это позволило не только получить основные параметры движения жидкости и теплообмена, но и дало возможность визуально оценить картину течения и определить проблемные места (рис. 3).

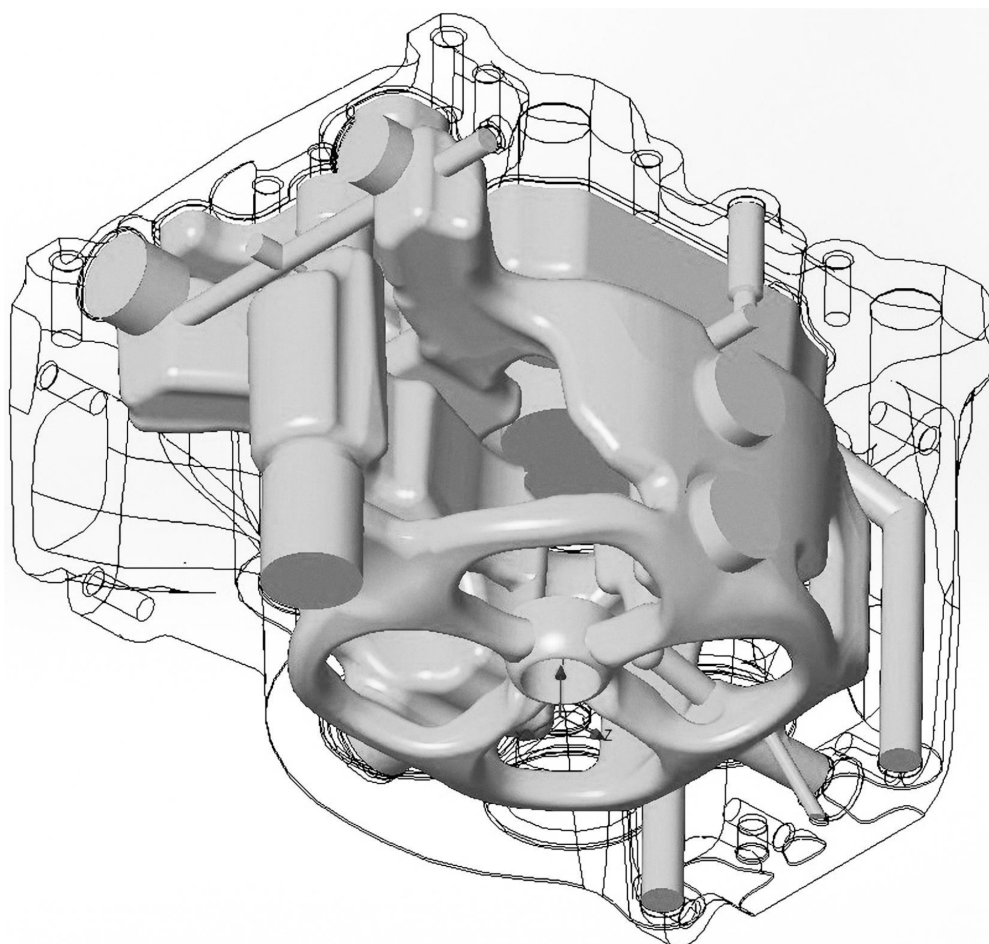


Рис. 2. Полость охлаждения головки цилиндра дизеля

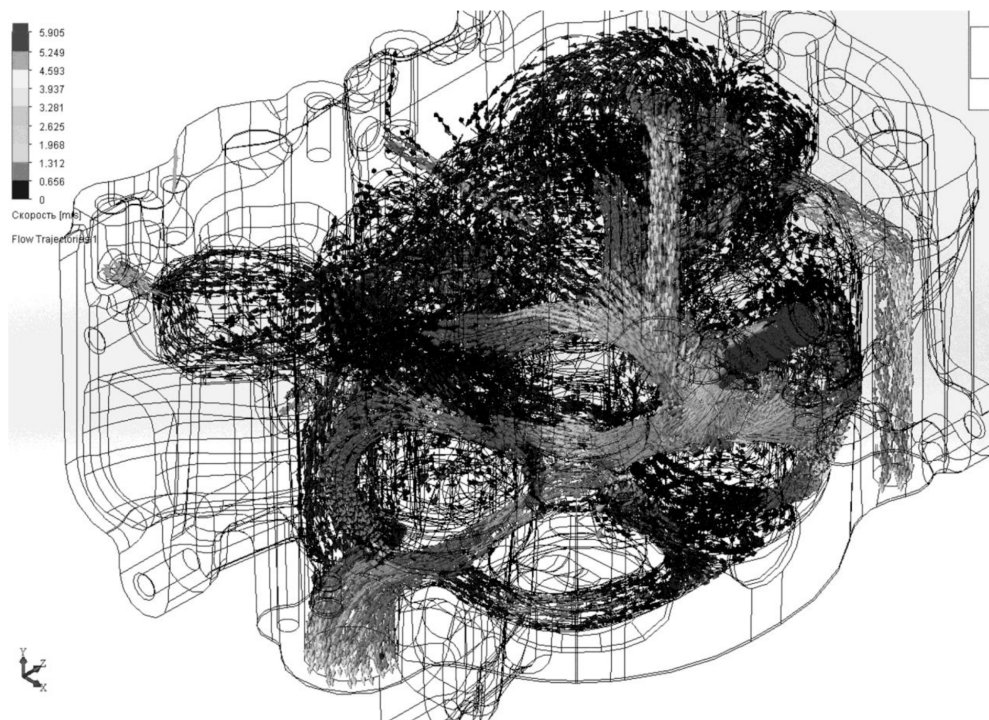


Рис. 3. Векторная картина скоростей для стандартной сетки

Важной оценкой правильности решения является его сеточная независимость. В проведенном исследовании построено три типа расчетных сеток для ГЦД:

- стандартная сетка (70927 элементов);
- грубая сетка (33611 элементов);
- точная сетка со сгущением в пристеночной области (158242 элементов).

Поля скоростей в объеме практически одинаковы для разных типов расчетных сеток, отклонения величин давлений на входе от среднего значения не превышают 0,1%. В целом это говорит о независимости осредненных параметров течения от выбора сетки, поэтому по умолчанию выбрана стандартная сеточная схема, как наиболее сбалансированная между качеством итогового решения и затрачиваемым временем. Общее количество объемных КЭ составило 70927 ячеек со следующими параметрами расчетной сетки: ячейки в текучей среде – 18268; ячейки в твердом теле – 17729; частичные ячейки – 34930.

Для расчета гидродинамики и теплообмена в полости охлаждения задаются граничные условия (ГУ), а именно объемный расход ОЖ на входе в полость, который определяется исходя

из расходной характеристики насоса для следующих режимов его работы: 80, 240 и 400 л/мин.

На выходных отверстиях задано атмосферное давление $P_a = 101325$ Па. В процессе решения задачи давление на входе в полость рассчитывается исходя из условия обеспечения постоянства расхода через расчетную область.

В качестве ОЖ принята вода со следующими параметрами: температура на входе $T = 363$ К; плотность $\rho = 965,2$ кг/м³ при 363 К; теплоемкость $c_p = 4182$ Дж/кг·К; теплопроводность $\lambda = 0,6$ Вт/м·К; динамическая вязкость $\mu = 0,001003$ кг/м·с.

Возникающие колебания теплового потока, связанные с цикличностью процессов в цилиндре, затухают в слое, составляющем десятые доли миллиметра. Поэтому на поверхности ГЦД со стороны КС накладываются граничные условия теплообмена 3-го рода. Осредненное значение коэффициента теплоотдачи 1052 Вт/(м²К) и результирующая температура 957 К получены с применением разрабатываемого программно-методического комплекса (ПМК) «Расчет нагрузок и граничных условий для проектирования элементов ГЦД» для режима номинальной мощности с использованием данных рабочего процесса.

При задании параметров турбулентности выдвинуто предположение, что течение в полостях СО будет иметь низкую степень турбулентности. Поскольку определение начальных условий турбулентности в данной задаче является процессом неявным, то выбрано задание развитой турбулентности на входе, вследствие чего программе легче сформировать турбулентное поле. Таким образом, задавались следующие значения параметров турбулентности: интенсивность турбулентности $Tu = 2\%$; масштаб турбулентности — 0,002 м.

К сожалению, ни одна из существующих моделей турбулентности не является универсальной для всех видов решаемых задач; выбор модели обусловлен физическими параметрами исследуемого течения, практическим опытом моделирования подобных задач, требуемой точностью решения, ресурсоемкостью и ограничениями по времени расчета. Примененный для решения задачи метод осреднения по Рейнольдсу (Reynolds-Averaged Navier-Stokes — RANS) на основе $k-\epsilon$ модели, подразумевает расчет пере-

носа осредненных величин в потоке, в то время как турбулентные явления всех масштабов полностью моделируются. Это значительно снижает вычислительные затраты, благодаря чему метод широко используется в инженерных расчетах.

Для отслеживания изменения величин в процессе расчета установлены точки мониторинга, контролируемые такие параметры, как давление на входе, температура охлаждаемой поверхности и температуры в различных точках твердого тела и ОЖ. Достижение этими параметрами установленных значений служит дополнительным сигналом о нахождении устойчивого решения, что определяется сходимостью решения, контролируемой по графику сходимости нормированных невязок (рис. 4).

Невязки представляют собой погрешности дискретизации уравнений, по мере сходимости которых можно судить о сходимости решения. По умолчанию Flow Simulation считает решение сошедшимся по достижении нормированными невязками значения 10^{-5} для всех уравнений, что означает: абсолютные невязки в результате итераций уменьшается на 5 порядков.

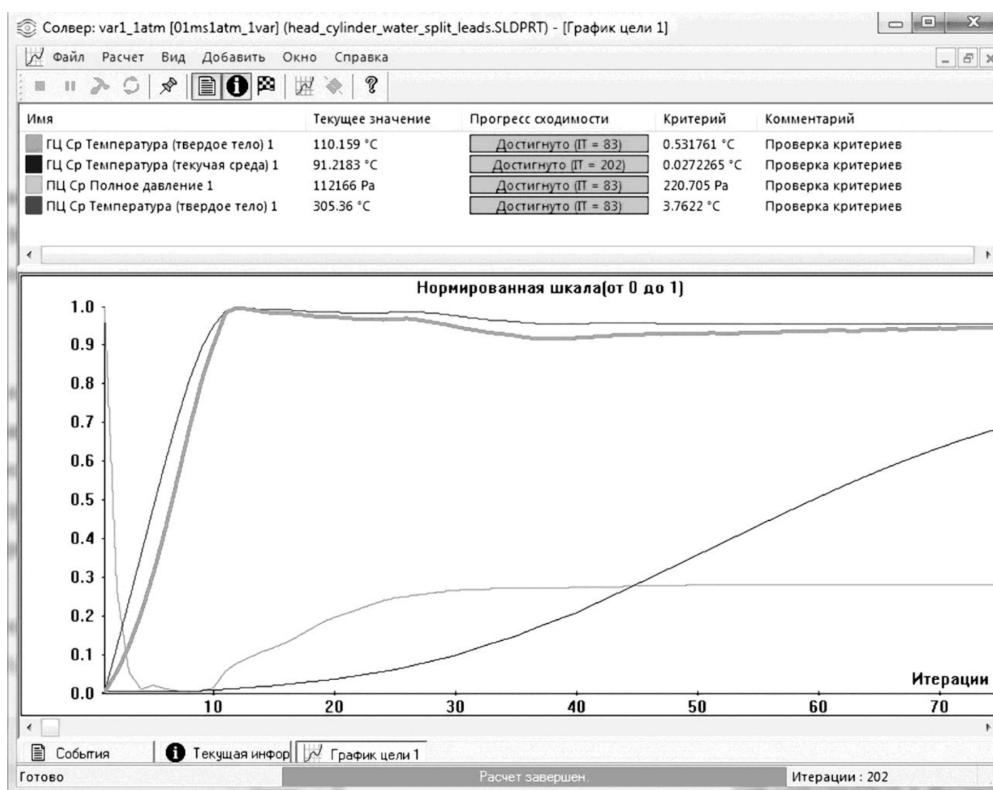


Рис. 4. Окно отображения сходимости нормированных невязок

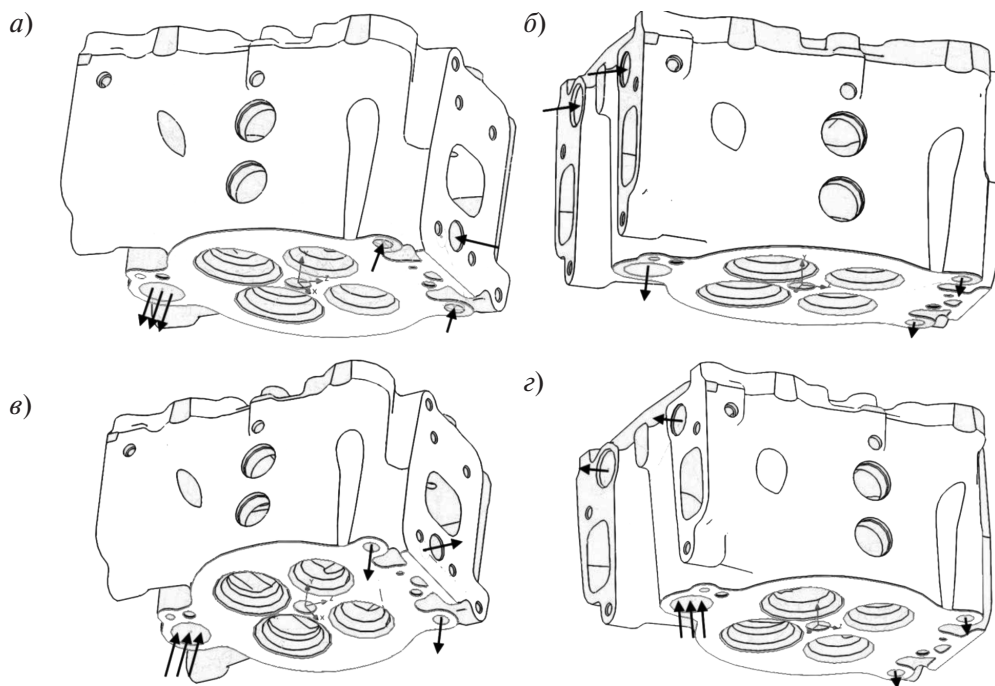


Рис. 5. Схемы расположения впускных и выпускных отверстий в ГЦД

Все рассмотренные конфигурации полости СО (рис. 5) в целом эффективно справляются с задачей охлаждения ГЦД. Среди них определены наиболее оптимальные варианты конструкции подвода/отвода хладагента, а также выявлен наилучший, показавший максимальные температурные напоры и градиенты.

Вариант 1, базовый (рис. 5, а). ОЖ подводится напрямую из блока в верхнюю зону полости ГЦД и, кроме того, в нижнюю часть ГЦД через боковое отверстие со стороны впуска. Отвод выполняется отбором воды из верхней и нижней части через отверстие большого диаметра в блок. В первую очередь движение ОЖ становится интенсивным в верхней части ГЦД, но в нижней ее части оно недостаточно интенсивно.

Вариант 2 (рис. 5, б). Подвод осуществляется через два боковых отверстия со стороны выпуска в верхнюю часть ГЦД. Отвод осуществляется при помощи двух отверстий в верхней области головки, а также через отверстие большого диаметра совокупно со всех уровней. Отмечается интенсификация движения жидкости в зоне впускных клапанов, но формируются и застойные зоны в узких канавках, поскольку ток ОЖ здесь происходит за счет наличия вихревых

явлений. Сравнение результатов расчета базового варианта с вариантом №2 показало:

линии тока свидетельствует о менее равномерном распределении хладагента по полости; поток более интенсифицирован в нижней части ГЦД;

скорость течения в 8 раз выше вследствие меньшей толщины канала;

имеются застойные зоны;

распределение температур на стенке менее однородно, а амплитуда температур сравнительно выше;

несмотря на присутствие застойных зон в канавках, повышение температур здесь незначительно, что объясняется наличием вихревых явлений, способствующих теплообмену со стенки.

Вариант 3 (рис. 5, в). Через отверстие крупного диаметра из блока обеспечивается подвод ОЖ, которая распределяется как по нижней, так и по верхней зонам ГЦД. Отбор происходит в верхней части через два отверстия в блок, а также из нижней части через отверстие в стенке со стороны впускных ГВК. Интенсивность течения в верхнем уровне ГЦД сопоставима с нижней частью, что приводит к интенсификации теплообмена со стороны выпускных клапанов. По

результатам расчета данного варианта полости СО сделаны следующие выводы:

интенсивность течения в верхней части головки сопоставима с нижней, где движение жидкости имеет лучшую интенсификацию со стороны выпускных клапанов;

теплосъем со стенки достаточно эффективный, и при данной схеме организации движения ОЖ нагретая часть охлаждается наиболее интенсивно. В результате температура для рассматриваемого варианта на режиме 80 л/мин не превышает 631 К.

Вариант 4 (рис. 5, з). ОЖ поступает из блока в верхний и нижний уровень через отверстие большого диаметра, а отвод производится исключительно из верхней части через два отверстия в блок и два отверстия в стенке со стороны выпускного ГВК. В зоне выпускных клапанов наблюдается активная интенсификация движения хладагента. Для данного варианта полости СО результаты расчета показали:

течение характеризуется крайней неравномерностью, но зона, прилегающая к выпускным клапанам, омывается весьма эффективно;

отмечено, что температуры со стороны выпускных клапанов значительно ниже температур в области впускных клапанов, поскольку здесь

происходит значительное увеличение застойной области.

Сравнение результатов расчета вариантов полостей охлаждения проводится по комплексу параметров, в который входят: среднерасходная скорость C_{cp} ; максимальная скорость C_{max} ; минимальная скорость C_{min} ; средняя температура охлаждаемой поверхности со стороны КС T_{cp} ; максимальная температура T_{max} охлаждаемой поверхности со стороны КС; минимальная температура T_{min} охлаждаемой поверхности со стороны КС.

Из таблицы видно, что наиболее неравномерный ток ОЖ обеспечивают варианты 2 и 4, что в большей степени проявляется в зоне впускных окон. Наиболее чувствительным к изменению расхода является базовый вариант 1, а наименьшая зависимость наблюдается у варианта 2.

Полученные результаты свидетельствуют о значительном влиянии геометрической формы полости охлаждения, к которой напрямую относится размещение точек входа и выхода ОЖ. Проведенная оптимизация позволяет значительно повысить равномерность охлаждения ГЦД. Таким образом, еще до этапа физического эксперимента существенно упрощается своевременное принятие мер по интенсификации те-

Основные результаты сопоставления вариантов полостей

Режим работы, л/мин	C_p , м/с	C_{max} , м/с	C_{min} , м/с	T_{cp} , м/с	T_{max} , К	T_{min} , К
Вариант 1						
80	1,13	0,91	0	617	692	490
240	2,75	3,41	0	585	659	465
400	4,59	5,66	0,01	572	642	458
Вариант 2						
80	0,66	0,76	0	619	685	484
240	2,01	2,41	0	581	647	462
400	3,36	4,02	0	569	638	453
Вариант 3						
80	2,39	2,88	0	576	633	460
240	7,21	8,74	0,01	559	620	450
400	12,1	14,5	0,01	552	617	445
Вариант 4						
80	0,97	0,85	0	585	657	460
240	2,61	2,9	0	558	636	449
400	4,36	4,83	0	557	631	447

*Нулями заменены численные значения, не превышающие погрешность

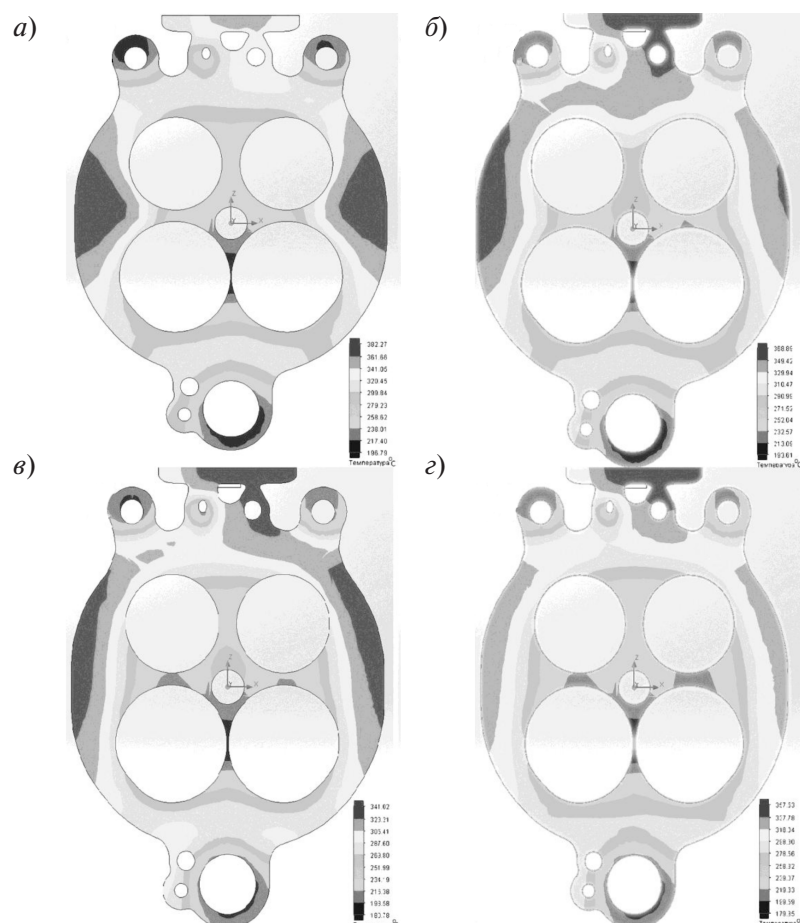


Рис. 6. Поля температур на периферии огневой плиты

плообмена и улучшению гидродинамики потока как в полостях головки, так и во всей системе охлаждения ДВС.

По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы:

решение задачи оптимизации полостей охлаждения ГЦД требует использовать расчетный комплекс, охватывающий процессы моделирования гидродинамики хладагента в полости сложной трехмерной формы, а также сопряженные вычисления температур ОЖ и головки;

критерии оптимизации — это минимальные температурные значения на огневой поверхности ГЦД при допустимом уровне неравномерности температур по периферии нижней плиты (рис. 6), обеспечивающие допустимую неравно-

мерность осевых деформаций головки с целью облегчения работы газового стыка ДВС;

по итогам решения поставленной задачи предложен вариант полостей охлаждения разрабатываемой ГЦД, которое удовлетворяют исходной постановке задачи оптимизации. Выбрана оптимальная температура ОЖ на входе в полость, равная 363 К, а также характеристика насоса, обеспечивающая расход 240 л/мин на номинальном режиме работы двигателя; оптимизировано расположение точек входа—выхода хладагента (вариант 3);

предложенный вариант ГЦД обеспечивает снижение по сравнению с базовым вариантом температур на нижней плите на 26 К при уменьшении неравномерности распределения температур по периферии КС в данной зоне на 16 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Алямовский А.А.** Инженерный анализ в среде SolidWorks Simulation // САПР и графика. 2008. № 12. С. 59–64.
2. **Маслов А.** Формирование информационного пространства по созданию силовых модулей на основе CALS/ИПИ технологий // Двигателестроение. 2013. № 2. С. 33–36.
3. **Patankar S.V.** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
4. **Blazek J.** Computational fluid dynamics: principles and applications. Elsevier Science, 2005. 496 p.
5. **Маластовский Н.С.** Методика определения локальных граничных условий со стороны охлаждения при расчете температурных полей крышек цилиндров двигателей : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02. / МГТУ им. Н.Э.Баумана. М., 2011. 156 с.
6. **Стефановский Б.С.** Теплонапряженность деталей быстроходных поршневых двигателей. М.: Машиностроение, 1978. 128 с.
7. **Новенников А.Л.** Исследование жидкостного охлаждения головки и гильзы цилиндра автотракторного дизеля : Дис. ... канд. техн. наук : 05.04.02. / Ярославский политехнический ин-т. М., 1973. 150 с.
8. **Новенников А.Л.** Теоретические аспекты, методы и пути улучшения теплового состояния охлаждаемых деталей поршневых двигателей : Дис. ... докт. техн. наук : 05.04.02 / Ярославский политехнический ин-т. М., 1993. 213 с.
9. **Чайнов Н.Д., Иващенко Н. А.** Расчет теплового и напряженнодеформированного состояния деталей ДВС на ЭВМ. М.: Изд-во МВТУ, 1982. 70 с.
10. **Розенблит Г.Б.** Особенности расчета и задания граничных условий при моделировании температурных полей в клапане и крышке цилиндра дизеля // Двигателестроение. 1982. № 9. С. 21–24.
11. **Гаврилов А. К.** Системы жидкостного охлаждения автотракторных двигателей. М.: Машиностроение, 1966. 162 с.
12. **Малюх В.Н.** Введение в современные САПР: Курс лекций. М.: ДМК Пресс, 2010. 192 с.
13. **Галлагер Р.** Метод конечных элементов. Основы. М.: Мир, 1984. 421 с.
14. **Галышев Ю.В.** Задание граничных условий теплообмена в рабочих полостях головки цилиндра четырехтактного двигателя внутреннего сгорания // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2014. № 2 (195). С. 58–64.
15. **Петриченко Р. М.** Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1975. 224 с.
16. **Чайнов Н. Д.** Конструирование двигателей внутреннего сгорания / Под ред. Н.Д. Чайнова. М.: Машиностроение, 2008. 496 с.

REFERENCES

1. **Alyamovskiy A.A.** Inzhenernyy analiz v srede SolidWorks Simulation [The engineering analysis in the environment of SolidWorks Simulation]. *SAPR i grafika*. 2008. №. 12. S. 59–64. (rus)
2. **Maslov A.** Formirovaniye informatsionnogo prostranstva po sozdaniyu silovykh moduley na osnove CALS/IPI tekhnologiy. [Formation of information space on creation of power modules on the basis of CALS/IPI technologies]. *Dvigatelayestroyeniye*. 2013. № 2. S. 33–36. (rus)
3. **Patankar S.V.** Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw-Hill: Hemisphere Publishing Corporation, 1980. 197 p.
4. **Blazek J.** Computational fluid dynamics: principles and applications. Elsevier Science, 2005. 496 p.
5. **Malastovskiy N.S.** Metodika opredeleniya lokalnykh granichnykh usloviy so storony okhlazhdeniya pri raschete temperaturnykh poley kryshek tsilindrov dvigateley : Dis. ... kand. tekhn. nauk [Method for determining the local boundary conditions on the part of the cooling in the calculation of temperature fields of engine cylinder heads] / MSTU Bauman. Moscow, 2011, 156 p. (rus)
6. **Stefanovskiy B.S.** Teplonapryazhennost detaley bystrokhodnykh porshnevnykh dvigateley [Heat-stressed parts of the fast piston engines]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1978, 128 p. (rus)
7. **Novennikov A.L.** Issledovaniye zhidkostnogo okhlazhdeniya golovki i gilzy tsilindra avtotraktornogo dizelya : Dis. ... kand. tekhn. nauk [Investigation of liquid cooling of the head and cylinder for the autotractor diesel engine] / Yaroslavl Polytechnic Inst. Moscow, 1973, 150 s. (rus)
8. **Novennikov A.L.** Teoreticheskiye aspekty, metody i puti uluchsheniya teplovogo sostoyaniya okhlazhdayemykh detaley porshnevnykh dvigateley : Dis. ... dokt. tekhn. nauk [Theoretical aspects, methods and ways of improving the thermal state of the cooled parts of piston engines] / Yaroslavl Polytechnic Inst. Moscow, 1993. 213 s. (rus)
9. **Chaynov N.D., Ivashchenko N.A.** Raschet teplovogo i napryazhennodeformirovannogo sostoyaniya detaley DVS na EVM [The calculation of the thermal and stress-strain state of the engine parts on a computer]. Moscow: Izd-vo MSTV Bauman, 1982. 70 p. (rus)

10. **Rozenblit G.B.** Osobennosti rascheta i zadaniya granichnykh usloviy pri modelirovanii temperaturnykh poley v klapane i kryshke tsilindra dizelya [Features of the calculation and the boundary conditions for the modeling a temperature fields in the valve and cylinder cover in diesel engine]. *Dvigatelaye stroeniye*. 1982. № 9. S. 21–24 (rus.)
11. **Gavrilov A.K.** Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya avtotraktornykh dvigateley [Liquid cooling systems of automotive engines]. Moscow : Mashinostroyeniye, 1966. 162 p. (rus.)
12. **Malyukh V.N.** Vvedeniye v sovremennyye SAPR: Kurs lektsiy [Introduction into modern CAD systems: Lectures]. Moscow: DMK Press, 2010. 192 s. (rus.)
13. **Gallager R.** Metod konechnykh elementov. Osnovy [The finite element method. The Basics]. Moscow: Mir, 1984. 421 s.
14. **Galyshev Yu.V., Shabanov A.Yu., Zaytsev A.B., Nemchikova M.N.** Zadaniye granichnykh usloviy teploobmena v rabochikh polostyakh golovki tsilindra chetyrekhtaktnogo dvigatelya vnutrennego sgoraniya [The boundary conditions of heat transfer in the working cavity of the cylinder head of the four-stroke internal combustion engine]. *St. Petersburg State Politechnical University Journal*. St. Petersburg: SPbGPU Publ. 2014. №2 (195). S. 58–64.
15. **Petrichenko R.M.** Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya bystrokhodnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya [Liquid cooling system of high-speed internal combustion engines]. Leningrad: Mashinostroyeniye, 1975. 224 p. (rus.)
16. **Chaynov N.D. [and others].** Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya [Construction of internal combustion engines] / Ed. N.D. Chaynov. Moscow, Mashinostroyeniye, 2008. 496 s. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

ГАЛЫШЕВ Юрий Виталиевич — доктор технических наук заведующий кафедрой Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: galyshev57@yandex.ru

GALYSHEV Yuri V. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: galyshev57@yandex.ru

ЗАЙЦЕВ Алексей Борисович — кандидат технических наук, доцент Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: abzaytsev@mail.ru

ZAYTSEV Aleksei B. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: abzaytsev@mail.ru

АЛЕКСЕЕВ Дмитрий Геннадьевич — аспирант Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.

E-mail: alekseyeff@mail.ru

ALEKSEYEFF Dmitrii G. — Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.

29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.

E-mail: alekseyeff@mail.ru