

УДК 621.432

В.А. ЖУКОВ

*Рыбинская государственная авиационная технологическая академия  
имени П.А. Соловьева, Тутаевский филиал, Тутаев, Россия*

## РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ ДВС

*Статья посвящена оценке перспектив использования высокотемпературного охлаждения комбинированных двигателей с целью повышения их энергетической эффективности. Исследования влияния температурного уровня системы охлаждения проведены для двигателя семейства ЯМЗ-840. Результаты исследований свидетельствуют о возможности повышения экономичности ДВС путем перехода на высокотемпературное охлаждение и предпочтительные области использования высокотемпературного охлаждения. Предложены направления конструктивных модернизаций двигателя, обеспечивающих эффективность и надежность высокотемпературного охлаждения.*

**Ключевые слова:** система охлаждения, температурный уровень, показатели энергетической эффективности, давление в системе, модернизация двигателя.

### Введение

Системы охлаждения современных и перспективных форсированных поршневых и комбинированных двигателей должны обеспечивать оптимальное и стабильное тепловое состояние деталей и узлов. Оптимальным следует считать такой температурный уровень, при котором материалы деталей сохраняют свои прочностные свойства, моторные масла сохраняют высокую смазывающую и несущую способность, а потери теплоты через систему охлаждения минимальны.

Известно, что на работе двигателя отрицательно сказывается как недостаточное, так и излишнее охлаждение. Перегрев двигателя вызывает ухудшение наполнения цилиндров воздушным зарядом, неполное сгорание топлива и его повышенный расход, нарушение условий жидкостного трения, возникновение повышенных износов и задиров трущихся поверхностей в узлах трения, повышенный расход масла на угар, снижение прочностных свойств материалов и появление термоусталостных разрушений. Переохлаждение двигателя приводит к чрезмерному повышению вязкости масла и, в следствие этого, к возрастанию механических потерь, снижению эффективного КПД двигателя, а также к ухудшению смесеобразования и воспламенения, переносу процесса сгорания на линию расширения и повышенным расходам топлива.

Удельное количество теплоты, отводимое от двигателя системой охлаждения, составляет на номинальных режимах работы от 12 до 35 %, а с переходом на долевые нагрузки эти потери еще более

возрастают. Очевидно, что для повышения эффективности двигателей тепловые потери, в том числе, и через систему охлаждения необходимо сокращать.

В перспективных системах охлаждения сокращение тепловых потерь осуществляется за счет повышения температуры охлаждающей жидкости.

Статистические данные по развитию и совершенствованию поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) свидетельствуют о непрерывном повышении температурного уровня жидкостных систем охлаждения. Если в 60-е годы температура воды на выходе из двигателя рекомендовалась 50...55 °С, то позднее этот уровень поднялся до 60...65 °С, а когда в дизелях стали использовать сернистые топлива появились рекомендации повысить температуру воды до 70...75 °С. В современных двигателях рекомендуются еще более высокие температуры – 75...85 °С, а перспективными считаются высокотемпературные системы охлаждения (ВТО), в которых температура охлаждающей жидкости превышает 100 °С [1, 2].

Поддержание столь высоких температур стало возможным благодаря эффективным мерам по интенсификации охлаждения деталей цилиндропоршневой группы, приближению охлаждающей жидкости к тепловоспринимающим поверхностям, применению более высококачественных моторных масел.

### 1. Постановка задачи

В настоящее время системы ВТО приобретают широкое распространение, а различные конструктивные особенности и условия их эксплуатации позво-

ляют разделить их на две группы. Первая – с парообразованием внутри полостей охлаждения. В условиях кипения коэффициент теплоотдачи существенно возрастает. В связи с этим оптимальной температурой систем ВТО данного типа следует считать такую, при которой наступает развитое поверхностное кипение. Вторая группа – системы без парообразования внутри полостей охлаждения, т.е. системы охлаждения с последующим парообразованием. Системы охлаждения с последующим парообразованием предусматривает охлаждение ДВС охлаждающей жидкостью с температурой выше 100 °С за счет повышения давления, создаваемого циркуляционным насосом или дополнительными элементами системы.

Однако влияние повышения температурного уровня системы охлаждения на показатели рабочего процесса ДВС и состояние его деталей носит не однозначный характер, что требует проведения исследований для установления оптимального уровня повышения температуры охлаждающей жидкости, определения предпочтительных областей применения ВТО и разработки конструкций, позволяющих его реализовывать.

## 2. Содержание исследований и полученные результаты

Для решения поставленных задач необходимо рассмотреть особенности теплообмена в полостях охлаждения и влияние изменений интенсивности теплоотвода при переходе на высокотемпературное охлаждение на показатели рабочего процесса ДВС.

Теплоотдача от стенок гильзы и крышки цилиндров к ОЖ характеризуется сложными процессами теплообмена, наличием локальных зон пристеночного слоя жидкости, где изменяется ее агрегатное состояние при вынужденном течении и вибрации теплоотдающей поверхности. Вследствие этого в полостях охлаждения имеют место три режима теплоотдачи [4]:

– конвективный теплообмен без фазовых переходов жидкости, интенсивность которого в значительной мере определяется относительной скоростью потока, формой канала и характеристиками теплоносителя (I);

– теплообмен в присутствии пристеночного кипения (II);

– теплообмен при кипении в объеме (III).

Характер теплообмена определяется плотностью тепловых потоков, температурами теплоотдающей поверхности и охлаждающей жидкости.

При увеличении температуры охлаждающей жидкости до 90...95 °С наблюдается линейный рост температуры стенок и коэффициента теплоотдачи, температура жидкости в пристенном пограничном

слое при этом не превышает температуры насыщения  $t_s$ . При дальнейшем повышении температуры охлаждающей жидкости температура в пограничном слое превышает температуру  $t_s$ , что приводит к появлению заторможенного кипения и более интенсивному повышению коэффициента теплоотдачи.

Переход заторможенного кипения в развитое пузырьковое обеспечивает резкий рост коэффициента теплоотдачи от стенки в охлаждающую жидкость. Следствием этого является некоторое замедление роста температуры стенки с повышением температуры охлаждающей жидкости. Первоначально поверхностное кипение возникает на отдельных наиболее нагретых участках поверхностей деталей, а затем по мере возрастания температуры охлаждающей жидкости и степени форсирования двигателя оно может распространиться на всю охлаждаемую поверхность. Локальное увеличение интенсивности теплоотвода приводит к искажению температурного поля детали, это необходимо учитывать при анализе ее теплового и напряженного состояния.

Температурный уровень, соответствующий переходу от режима конвективного теплообмена к режиму теплообмена при пузырьковом кипении может регулироваться путем изменения гидростатического давления в системе охлаждения. Повышение давления в системе затрудняет образование паровых пузырьков на охлаждаемой поверхности и увеличивает температурный интервал конвективного теплообмена. Зависимость температуры насыщения от гидростатического давления определяется по формуле

$$t_s \approx 315 \cdot p^{0,286}. \quad (1)$$

Экспериментальные исследования [5] позволили получить зависимости коэффициента теплоотдачи и температуры охлаждающей жидкости от давления в системе охлаждения. При прочих равных условиях повышение давления приводит к снижению коэффициента теплоотдачи.

Это объясняется тем, что с ростом давления увеличивается температура насыщения, и режим поверхностного кипения наступает при больших значениях температуры теплоотдающей поверхности. Эксперименты позволили установить качественные зависимости для коэффициентов теплоотдачи в охлаждающую жидкость [6]

$$\alpha \approx \frac{p}{p_0}; \quad (2)$$

$$\alpha \approx \Delta t_s^{-0,85}. \quad (3)$$

Снижение коэффициента теплоотдачи и повышение температур наружных поверхностей стенок цилиндра приводит к росту температур внутренних поверхностей деталей и осредненной за цикл температуры рабочего тела (рис. 1).

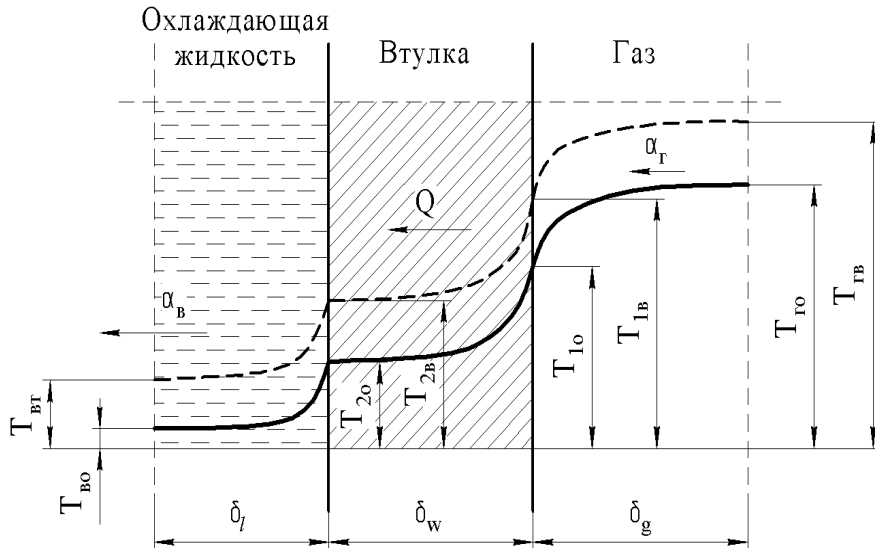


Рис. 1. Передача теплоты через цилиндрическую втулку

Изменение температурного уровня способствует сокращению тепловых потерь через систему охлаждения, что обеспечивает повышение экономичности двигателя при одновременном снижении термических напряжений в цилиндрической втулке, изменяются показатели политропы сжатия и расширения, коэффициент наполнения, условия смесеобразования, жесткость сгорания, условия смазывания и, следовательно, величина механических потерь в цилиндропоршневой группе.

Такой принцип реализуется в существующих высокотемпературных системах охлаждения, в которых поддерживается постоянное высокое давление.

Форсирование поршневых и комбинированных двигателей, сопровождающееся необходимостью отводить большее количество теплоты от деталей цилиндропоршневой группы, повышением температурного уровня деталей ЦПГ и увеличению плотности теплового потока, приводит к преобладанию в полостях охлаждения теплообмена в присутствии поверхностного кипения, значительному увеличению коэффициента теплоотдачи и, следовательно, к чрезмерным потерям в ОЖ.

Для сокращения потерь через систему охлаждения необходимо исключить условия для возникновения развитого кипения в полостях охлаждения при повышенном температурном уровне деталей цилиндропоршневой группы.

Для определения влияния высокотемпературного охлаждения на показатели работы ДВС можно использовать методику, описанную в работе [4].

При переводе двигателя с нормальной системы охлаждения на высокотемпературную можно считать, что неизменными остаются площади теплопринимающих и теплоотдающих поверхностей,

расход теплоносителя и толщины теплопроводящих стенок. С достаточной степенью точности можно допустить постоянство теплопередающих функций  $\Pi_1$  – от рабочего тела к стенке цилиндра,  $\Pi_2$  – в теплопередающей стенке,  $\Pi_3$  – от стенки к охлаждающей жидкости. Изменение количества теплоты, отводимой через систему охлаждения, в этом случае определяется отношением

$$\frac{Q_{\text{охл}}^B}{Q_{\text{охл}}^H} = \frac{\Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3 \cdot t_{\text{охл}}^B}{\Pi_1 + \Pi_2 - \Pi_3 \cdot t_{\text{охл}}^H},$$

где  $Q_{\text{охл}}^B$ ,  $Q_{\text{охл}}^H$  – теплота отводимая через систему охлаждения соответственно при высокотемпературном и нормальном охлаждении;

$t_{\text{охл}}^B$ ,  $t_{\text{охл}}^H$  – температура охлаждающей жидкости соответственно при высокотемпературном и нормальном охлаждении.

Уравнения  $n$  независимых переменных, описывающие рабочий процесс двигателя, в общем случае нелинейны, поэтому решение системы таких уравнений может вызвать значительные трудности. Однако, если кривизна поверхности рабочих параметров невелика, то возможна замена поверхности плоскостью, касательной к точке А, в области которой производится изучение процесса. Аналитически эта операция над системой уравнений представляет ее разложение в ряд при использовании только первых (линейных) членов. Все частные производные по  $n$  независимым переменным вычисляются в окрестностях точки А. В случае изменений одного из параметров, характеризующих рабочий процесс по сравнению с параметром в точке А, изменения, происходящие с другими параметрами, можно искать не на криволинейной поверхности, а на плоскости. Подобные расчеты удобнее выполнять в отно-

сительных приращениях. Если приращение параметра  $\Delta x$ , а его значение в точке А равняется  $x$ , то относительное приращение составляет

$$\frac{\Delta \bar{x}}{\bar{x}} = \frac{\Delta x}{x}.$$

На основании уравнений, связывающих параметры рабочего цикла, с использованием описанного метода линеаризации уравнений [4] были определены значения относительных изменений основных параметров для четырехтактных дизелей коэффициента наполнения  $\Delta \eta_v$ , коэффициента избытка воздуха  $\Delta \alpha$ , механического КПД  $\Delta \eta_m$ , индикаторного КПД  $\Delta \eta_i$ , эффективного КПД  $\Delta \eta_e$ .

Перевод двигателя на ВТО не приводит к изменению давления начала сжатия, и давления остаточных газов. При этих условиях изменение коэффициента наполнения будет определяться только подогревом заряда на впуске, величина которого возрастает пропорционально температуре охлаждающей жидкости. Степень подогрева рабочего заряда определяется условиями теплообмена со стенками цилиндра, массой заряда, величиной температурного напора. Так как температура стенок цилиндра связана с температурой охлаждающей жидкости  $t_{ст} = t_{ст}(t_{охл})$ , то ее приращение составляет

$$\Delta t_{ст} = \left( \frac{\partial t_{ст}}{\partial t_{охл}} \right)_0 \cdot \left( \frac{t_{охл}}{t_{ст}} \right)_0 \cdot \Delta \bar{t}_{ст}.$$

Индекс 0 указывает, что параметр вычислен в окрестностях исходного режима.

Проведенные расчеты, выполненные для двигателя 8 ЧН 14/14, позволили установить коэффициенты линейных уравнений  $\eta_v = C_1 \cdot \Delta t_{охл}$ ,  $\alpha = C_2 \cdot \Delta t_{охл}$ ,  $\eta_{мех} = C_3 \cdot \Delta t_{охл}$ ,  $\eta_i = C_4 \cdot \Delta t_{охл}$ ,  $\eta_e = C_5 \cdot \Delta t_{охл}$ .

Значения параметров рабочего цикла  $\eta_v$ ,  $\alpha$ ,  $\eta_m$ ,  $\eta_i$ ,  $\eta_e$  характерные для номинального режима двигателя семейства ЧН 14/14 при нормальном охлаждении ( $t_{охл} = 80$  °С) и результаты расчетов приведены на рис. 2.

Полученные результаты хорошо согласуются с результатами исследований двигателей Ч 10,5/13 и 6Ч 15/18, приведенными в работе [4].

Повышение температуры охлаждающей жидкости приводят к снижению коэффициентов наполнения и избытка воздуха. Основная часть механических потерь в ДВС (до 70 %) приходится на потери трения в цилиндропоршневой группе. Величина этих потерь существенно зависит от вязкости масла, которая, в свою очередь, определяется температурой поверхности гильзы цилиндра [5]. При повышении температуры динамическая вязкость масла резко уменьшается. Полученная линеаризованная зависимость показывает, что рост температуры охлаж-

дающей жидкости приводит к увеличению механического КПД, причем тем в большей степени, чем ниже механический КПД двигателя при нормальном охлаждении. Повышение механического КПД возможно до определенной температуры, значение которой ограничивается свойствами масла, его способностью сохранять смазывающие свойства и противостоять термическому разложению.

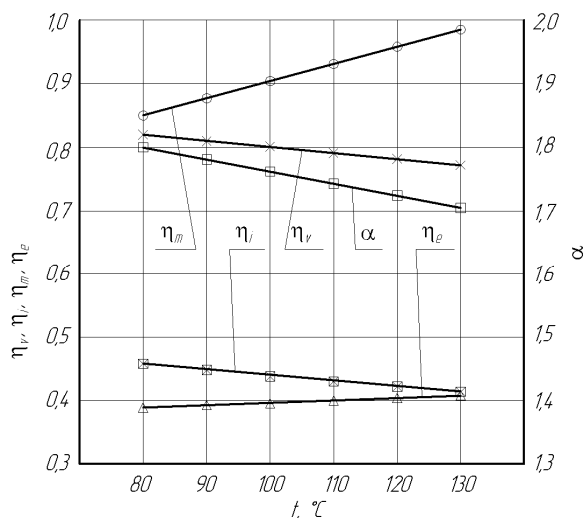


Рис. 2. Влияние температуры охлаждения на показатели работы ДВС

Анализ полученных зависимостей позволяет установить условие, при котором перевод двигателя на ВТО будет обеспечивать увеличение его эффективного КПД. Таким условием является выполнение неравенства

$$(1,1 \dots 1,4) \cdot 10^{-4} \cdot \frac{K_2 \cdot (1 - \eta_{m0})}{\mu_t} \cdot t_{ст0} > 1,$$

где  $\eta_{m0}$  – механический КПД двигателя в нормальном режиме охлаждения;

$t_{ст0}$  – средняя температура стенок цилиндра при нормальном охлаждении;

$\mu_t$  – динамическая вязкость масла, взятая по температуре стенки цилиндра при данном режиме ВТО;

$K_2$  – коэффициент, характеризующий изменение механических потерь при переходе на ВТО.

Анализ данного неравенства показывает, что эффект от применения ВТО будет тем большим, чем:

- выше средняя температура стенок цилиндра;
- меньше величина механического КПД двигателя;
- меньше величина коэффициента динамической вязкости масла.

Помимо повышения эффективного КПД последствием перехода на ВТО является перераспре-

деление тепловых потоков: увеличиваются потери с отработавшими газами и уменьшается доля потерь с охлаждающей жидкостью. Например, для дизеля Д-70 увеличение температуры жидкости на выходе из двигателя с 80 до 120 °С приводит к уменьшению доли потерь через систему охлаждения почти в два раза. Сокращение теплоотвода позволяет резко (в 3...5 раз) уменьшить размеры водяных охладителей (радиаторов) [6].

В комбинированных двигателях, с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха в теплообменных аппаратах типа вода-воздух переход на ВТО приводит к уменьшению температурного напора между теплоносителями, снижению эффективности теплообменного аппарата и более заметному снижению коэффициента наполнения. Выполненные расчеты показали, что эффективность охладителей наддувочного воздуха типа вода-воздух будет удовлетворительной лишь при степенях повышения давления в компрессоре  $\pi_k$  не менее двух. При более низких степенях наддува необходимо использовать охладители наддувочного воздуха типа воздух-воздух, а для судовых двигателей целесообразно включать ОНВ во внешний контур водяного охлаждения.

Перевод двигателей на ВТО требует совершенствования регулирования теплового состояния.

Наибольшее распространение в настоящее время получили следующие способы регулирования температурного состояния двигателя [4].

1. Установка термостатов, направляющих охлаждающую жидкость по малому контуру (в периоды пуска и прогрева) или по большому через водяные или водо-воздушные холодильники.

2. Установка термодатчиков, управляющих автоматическим включением и отключением вентилятора, имеющего привод от электродвигателя.

3. Установка гидромуфт в механизм привода вентилятора, позволяющих регулировать частоту вращения вентилятора.

Указанные способы и их комбинации не всегда позволяют достичь требуемого качества регулирования теплового состояния ДВС. Перспективным направлением совершенствования систем охлаждения и управления теплоотводом представляется повышение давления в системе. Особенно эффективным этот метод представляется для высокофорсированных двигателей, в полостях охлаждения которых наблюдается поверхностное кипение.

Переход на высокотемпературное охлаждение с температурами жидкости на выходе из двигателя незначительно превышающими 100 °С можно осуществить за счет использования высококипящих жидкостей, например, серийно выпускаемых тосолов, температура кипения которых достигает 115 °С

[7]. Для более значительного увеличения температурного уровня необходимо повышать давление в системе охлаждения. Зависимость температуры кипения воды от давления определяется выражением

$$T_s = 273 + 560\sqrt[4]{p}, \text{ К},$$

где  $p$  – абсолютное давление в системе охлаждения.

В системе охлаждения с герметичным замкнутым контуром может быть реализован принцип поддержания постоянства заданного статического давления путем воздействия на воду с помощью сжатого воздуха.

## Заключение

Результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возможности перевода на ВТО комбинированных двигателей различного назначения с целью получения максимального эффективного КПД.

Для совершенствования систем ВТО целесообразно проведение модернизации конструкции двигателя, с целью улучшения наполнения цилиндра и повышения надежности двигателя.

Основные направления модернизации:

- применение глубокого охлаждения наддувочного воздуха и связанного управления режимами охлаждения цилиндра и наддувочного воздуха;
- применение механизмов газораспределения, обеспечивающих за счет числа впускных клапанов, их конструкции и оптимальных фаз газораспределения максимальное наполнение цилиндра;
- совершенствование принудительного охлаждения поршней, использование новых конструктивных материалов для их изготовления;
- применение моторных масел с повышенной термостойкостью.

Таким образом, внедрение ВТО может обеспечить повышение эффективного КПД двигателя и как следствие снижение расхода топлива.

В связи с этим высокотемпературное охлаждение можно рассматривать как одно из перспективных направлений совершенствования комбинированных двигателей.

## Литература

1. Левин М.И. Оптимальный температурный режим в системах охлаждения и требования к автоматическому регулированию температуры: сб. трудов ЦНИДИ / М.И. Левин. – М.-Л.: Машгиз, 1984. – № 26.
2. Стародомский М.В. Оптимизация температурного состояния дизельных двигателей / М.В. Стародомский, Е.А. Максимов. – К.: Наукова думка, 1987. – 168 с.

3. *Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей* / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.

4. *Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания* / Р.М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1975. – 224 с.

5. *Двигатели внутреннего сгорания* / В.Н. Луканин, К.А. Морозов, А.С. Хачиян и др. – В 3 кн. –

Кн. 1. *Теория рабочих процессов*. – М.: Высш. школа, 1995. – 368 с.

6. *Тимофеев В.Н. Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование* / В.Н. Тимофеев. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – 358 с.

7. *Негорючие теплоносители и гидравлические жидкости. Справ. руководство* / под ред. А.М. Сухотина. – Л.: Химия, 1979. – 360 с.

Поступила в редакцию 21.04.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, проректор А.А. Шатульский, Рыбинская государственная авиационная технологическая академия имени П.А. Соловьева, Рыбинск, Россия.

### РОЗРАХУНКОВА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ КОМБІНОВАНИХ ДВЗ

*В.А. Жуков*

Стаття присвячена оцінці перспектив використання високотемпературного охолодження комбінованих двигунів, з метою підвищення їх енергетичної ефективності. Дослідження, стосовно впливу температурного рівня системи охолодження, були здійснені для двигуна рідини ЯМЗ-840. Результати досліджень, свідчать про можливість підвищення економічності ДВЗ, шляхом переходу на високотемпературне охолодження і бажані області використання високотемпературного охолодження. Запропоновано напрямки конструктивних модернізацій двигуна, що забезпечують ефективність і надійність високотемпературного охолодження.

**Ключові слова:** система охолодження, температурний рівень, показники енергетичної ефективності, тиск в системі, розширювальний бак.

### CALCULATED APPRECIATION OF EFFICIENCY OF HIGH-TEMPERATURE COOLING FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH SUPERCHARGE

*V.A. Zhukov*

The article is devoted to valuation of perspective of using high-temperature cooling for internal combustion engine with supercharge for the purpose to increase its energy and fuel efficiency. Investigation of temperature level influence to parameters of engine was conducted for diesel engine YMZ-840. Results of investigation shows that fuel economy may be provided by high-temperature cooling. In the article condition for high-temperature cooling is determined. The article contains recommendations of engine's modernization which are necessary for achievement of high-temperature cooling system's efficiency and reliability.

**Key words:** cooling system, temperature level, parameters of energy efficiency, pressure in system, modernization of engine.

**Жуков Владимир Анатольевич** – канд. техн. наук, доцент, зав. кафедры технологии машиностроения и ДВС Тутаевского филиала Рыбинской государственной авиационной технологической академии имени П.А. Соловьева, Тутаев, Россия, e-mail: [gukovv@rambler.ru](mailto:gukovv@rambler.ru).