

УДК 621.43

DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-8-34-41

РЕЖИМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

А.В. Разуваев, Н.В. Краснолудский, Д.А. Костин

Аннотация. Представлена краткая историческая справка о применении высокотемпературного охлаждения (ВТО) двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Приведены в табличной форме типы некоторых ДВС, работающих с режимом ВТО. Дано обоснование причин появившегося интереса создания ДВС с режимом охлаждения ВТО. Проведен и представлен анализ систем, позволяющих обеспечить повышенную температуру охлаждающей жидкости на выходе из ДВС, а также достоинства и недостатки их. Представлены результаты анализа влияния режима ВТО на показатели работы двигателей. Сделаны ссылки на научно-техническую литературу, в которой представлены положительные моменты влияния повышенного и высокотемпературного охлаждения на параметры рабочего процесса и износ деталей цилиндра-поршневой группы. В заключение обосновывается применение режима ВТО на вновь разрабатываемых и действующих ДВС и энергетических установках на их базе.

Ключевые слова: режим высокотемпературного охлаждения; двигатели внутреннего сгорания; параметры ДВС с ВТО.

ИЧКИ КҮЙҮҮЧҮ КҮЙМЫЛДАТКЫЧТАРДЫ ЖОГОРКУ ТЕМПЕРАТУРАДА МУЗДАТУУ РЕЖИМИ

А.В. Разуваев, Н.В. Краснолудский, Д.А. Костин

Аннотация. Макалада ички күйүүчү кыймылдаткычтын жогорку температурада муздатуу режимин колдонуу жөнүндө кыскача тарыхый маалымкат берилген. Жогорку температурада муздатуу режимин менен иштеген айрым ички күйүүчү кыймылдаткычтардын түрлөрү таблиця түрүндө келтирилген. Жогорку температурада муздатуу режимин менен ички күйүүчү кыймылдаткычты түзүүгө пайда болгон кызыгуунун себептеринин негиздемеси берилди. Ички күйүүчү кыймылдаткычтан чыккан муздатуучу суюктуктун жогорку температурасын, ошондой эле алардын артыкчылыктары менен кемчиликтерин камсыз кылууга мүмкүндүк берген системаларга талдоо жүргүзүлгөн жана берилген. Жогорку температурада муздатуу режиминин кыймылдаткычтардын иштешине тийгизген таасирин талдоонун натыйжалары келтирилген. Жогорку температурадагы муздатуунун иш процессинин параметрлерине жана цилиндр-поршень тобунун бөлүктөрүнүн эскиришине тийгизген таасиринин оң жактарын чагылдырган илимий-техникалык адабияттарга шилтемелер жасалган. Жыйынтыгында жогорку температурада муздатуу режимин жаңы иштелип чыккан жана иштеп жаткан ички күйүүчү кыймылдаткычтарда жана алардын базасында энергетикалык орнотмолордо колдонуу негизделген.

Түйүндүү сөздөр: жогорку температурада муздатуу режимин; ички күйүүчү кыймылдаткычтар; жогорку температурада муздатуу режимин менен иштеген ички күйүүчү кыймылдаткычтардын параметрлери.

HIGH TEMPERATURE COOLING MODE INTERNAL COMBUSTION ENGINES

A.V. Razuvaev, N.V. Krasnoludsky, D.A. Kostin

Abstract. The article presents a brief historical background on the use of high-temperature cooling (VTO) of the internal combustion engine (ICE). The types of some internal combustion engines operating with the VTO regime are given in tabular form. The reasons for the emerging interest in creating an internal combustion engine with a VTO cooling mode are substantiated. An analysis of the system that allows to provide an increased temperature of the coolant at the outlet of the engine, as well as the advantages and disadvantages of them, was carried out and presented. The

results of the analysis of the impact of the VTO regime on the performance of engines are presented. According to the text of the article, references are made to scientific and technical literature in which the positive aspects of the influence of increased and high-temperature cooling on the parameters of the working process and wear of the cylinder-piston group are presented. In conclusion, the application of the VTO regime on newly developed and operating internal combustion engines and power plants based on them is substantiated on the materials of the article.

Keywords: high-temperature cooling mode; internal combustion engines; internal combustion engine parameters with HCO.

Впервые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с высокотемпературным охлаждением (ВТО) появились в авиации в годы Второй мировой войны. Это было обусловлено необходимостью увеличения боезапаса самолёта. Преимущество достигалось за счёт того, что при охлаждении двигателя использовалось кипение и испарение охлаждающей жидкости, а не её циркуляция с последующим охлаждением в радиаторах. Впоследствии к ВТО неоднократно возвращались, но широкого применения оно не получило.

Неослабевающий интерес к ВТО можно объяснить тем, что с его помощью удаётся, в ряде случаев, повысить технические и экономические характеристики двигателя. В то же время технические трудности обеспечения надёжности системы не позволяют заменить обычное охлаждение высокотемпературным. Хотя есть множество примеров удачного изготовления и эксплуатации некоторых двигателей. В таблице 1 представлены сведения о дизелях, работающих с ВТО [1].

Интерес к ВТО обусловлен еще и тем, что на машиностроительном заводе велись работы по созданию дизеля 12ЧН 21/21, форсированного до среднего эффективного давления $P_{\text{ме}} = 1,6$ МПа при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹ с системой ВТО, а кроме того, эти разработки и анализ технических параметров способен повысить эффективность разрабатываемых или эксплуатирующихся ДВС.

Отличительной особенностью работы двигателя с ВТО является то, что в такой системе охлаждения давление всегда выше, чем в системе охлаждения двигателя с температурой охлаждающей воды менее 373 К (100 °С). Если в обычной системе охлаждения величина давления определяется только гидравлическим сопротивлением системы охлаждения, то в системе ВТО давление определяется еще и величиной температуры охлаждающей жидкости и режимом ее охлаждения, который необходимо реализовать. Это с кипением во всем объеме, с пристеночным кипением или без кипения вообще. Каждая из перечисленных систем требует тщательного анализа ее реализации. А анализ показывает, что наиболее целесообразно следует принять систему охлаждения вообще без вскипания охлаждающей жидкости. Кроме этого, требуется еще и обеспечение кавитационного запаса водяного насоса [2] с целью обеспечения надежной и стабильной его работы. Сведения о некоторых двигателях, работающих с ВТО, представлены в таблице 1 [1].

Таблица 1 – Данные о некоторых двигателях, работающих с ВТО

Завод изготовитель (фирма)	Двигатель	Мощность, л.с	Температура охлаждающей воды, °С
«Трансмаш»	ТО Д-100	1500	120
им.Мальшева	Д-70	3000	120–125
«Трансмаш (Барнаул)»	Д-12	700	125
«Двигатель революции»	ТО ГК	1000	127
«Чикаго-Пневматик»	СР-69	260	126
«Зульцер»	5Д-8	1700	125
«Катерпиллер»	353	355	121
«Миррлисс»	К 55-16	4128	121
«Клокнер-голумбольдт-Дейтц»	6-8М-545	600	125

В последнем случае необходимо поддерживать повышенное давление, но зато в жидкости отсутствует ее пар, который может образовать паровую пробку, прекратив, таким образом, циркуляцию охлаждающей жидкости. Возможен вариант повышения давления в системе охлаждения за счет сжатия воздуха в расширительном баке за счет увеличения объема охлаждающей воды при ее нагревании. Несмотря на простоту решения и возможность автоматического поддержания давления (чем выше рабочая температура, больше расширение воды и больше давление сжатого воздуха), этот способ не применяется, т. к. необходимо обеспечить абсолютную герметичность расширительного бака и стабильный уровень жидкости в нем.

Известны конструкции системы ВТО, где давление поддерживается за счет парообразования в расширительном баке. Для этого в расширительном баке предусмотрено распыливающее устройство, через которое в расширительный бак подается часть охлаждающей воды, отводимой от двигателя. Этот способ недостаточно надежен, т. к. должна быть надежная теплоизоляция трубопровода, по которому горячая вода подается в расширительный бак, в противном случае в зимнее время давление пара может быть недостаточным для устойчивой работы системы охлаждения (из-за охлаждения воды). Чтобы повысить надежность работы такой системы, необходимо подавать избыточное количество воды в бак, а избыток пара выбрасывать в атмосферу через предохранительный клапан. По этой причине способ не получил распространения на тех двигателях, которые работают с ВТО. На рисунке 1 представлены некоторые схемы систем ВТО разных двигателей [1].

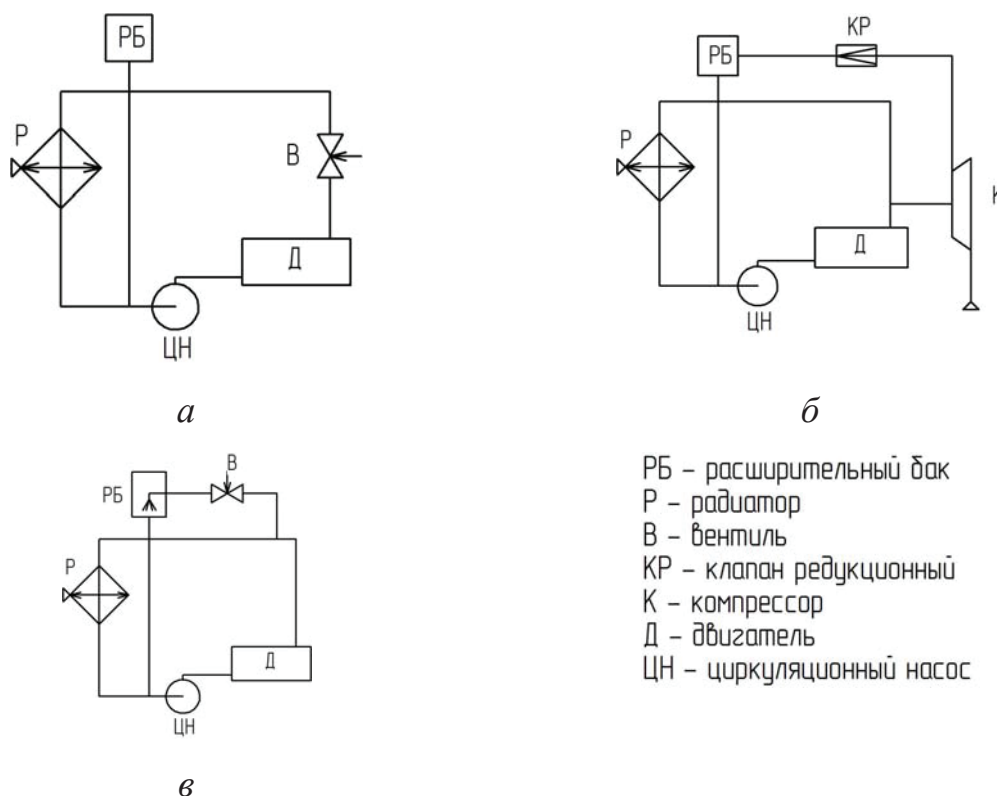


Рисунок 1 – Принципиальные схемы систем высокотемпературного охлаждения:

а – с дросселированием потока охлаждающей жидкости за дизелем;

б – с передачей воздуха под давлением в расширительный бак;

в – с парообразованием в расширительном баке при распыливании охлаждающей жидкости

Второй особенностью работы двигателя с системой ВТО следует отметить тот факт, что в системе циркулирует вода, насыщенная паровыми пузырьками, которые могут образовывать паровые пробки в узких местах полости системы охлаждения. По этой причине водяные полости двигателя, предназначенного для ВТО, должны иметь большие проходные сечения, чем двигатели с обычной системой охлаждения. Кроме этого, необходимо предусматривать элективные пароотводные устройства на тех участках системы, в которых могут образовываться паровые пробки [3].

Следует отметить, что циркуляционные насосы системы ВТО работают в более тяжелых условиях, чем в обычной системе охлаждения и, в первую очередь, это связано с повышением активности кавитационных процессов на рабочих органах насоса. Кроме того, происходят большие изменения в зазорах рабочих органов при изменении температуры воды после запуска двигателя и выхода на полную мощность. Если чрезмерное увеличение зазоров может только ухудшить напорную характеристику насоса, то их уменьшение может вызвать заклинивание насоса [4].

Эти особенности проявляются в отношении самой системы охлаждения. Что касается двигателя в целом, то здесь можно отметить, в первую очередь, общее повышение температурного уровня всех деталей и узлов двигателя. Причем это может иметь как положительные, так и отрицательные последствия.

Влияние ВТО на рабочий процесс оказывается через увеличение температуры камеры сгорания и изменение теплообмена между рабочим телом и стенками камеры сгорания. В первую очередь происходит увеличение подогрева воздушного заряда, поступающего в цилиндр и, как следствие, уменьшение коэффициента наполнения и уменьшение коэффициента избытка воздуха. С одной стороны, это приводит к увеличению температуры воздушного заряда в конце сжатия и облегчения процесса воспламенения топлива (для дизелей), но с другой стороны, из-за нехватки воздуха ухудшаются условия самого процесса сгорания, и увеличивается доля несгоревшего топлива.

В работе [3] предложен комплекс критериев работоспособности втулки цилиндра дизеля, который позволяет оперативно выяснить, что именно будет ограничивать надежную работу втулки цилиндра, а значит и всего дизеля. Вместе с тем, рост температуры стенок камеры сгорания приводит к снижению тепловых потерь в системе охлаждения и повышает использование тепла цикла.

В таблице 2 приведены экспериментальные данные по снижению тепловых потерь в системе охлаждения, взятые из работы [2] после перевода двигателей на ВТО. Возрастание температуры воздушного заряда в конце сжатия (при применении ВТО) интенсифицирует процесс испарения капелек топлива, впрыснутых в цилиндр (для двигателей с непосредственным впрыском), что сокращает продолжительность периода задержки воспламенения топлива. Кроме того, возрастает скорость сгорания топлива и скорость выделения тепла. Это позволяет закончить процесс сгорания топлива вблизи верхней мертвой точки (ВМТ), а значит увеличить температуру, при которой тепло подводится к рабочему телу. Увеличение температуры, при которой тепло подводится к рабочему телу, при неизменной температуре, с которой рабочее тело выбрасывается из двигателя во время такта выпуска, увеличивает термический КПД цикла. Одновременное увеличение этой температуры приводит к увеличению максимального давления сгорания, а это снижает механический КПД двигателя.

Увеличение доли сгоревшего топлива вблизи ВМТ снижает долю топлива, сгоревшего на линии расширения, что увеличивает топливную экономичность двигателя. Увеличение полноты сгорания топлива снижает дымность обработавших газов, но в то же время, увеличение температуры цикла, которое этому способствовало, приводит к увеличению количества образовавшихся окислов азота. Таким образом, снижение дымности может сопровождаться увеличением токсичности двигателя.

Из-за комплексного воздействия ВТО на рабочий процесс пока нет возможности аналогичного определения ВТО на каждый параметр рабочего процесса и на топливную экономичность двигателя в целом. Поэтому, в настоящее время представляют интерес результаты экспериментальных исследований разных авторов, исследовавших влияние ВТО на параметры рабочего процесса [5, 6].

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные по влиянию температуры охлаждающей воды на параметры рабочего процесса [1, 9].

Таблица 2 – Уменьшение теплотерь в системе охлаждения при изменении температуры охлаждающей жидкости

Исследователь	Двигатель	Изменение температуры охлаждающей воды, °С	Изменение теплотерь в воду, %
Б.Г. Волков	Д-35	С 75 до 115	24
Н.М. Глаголев	Д-70	С 80 до 120	5
В.М. Немчинов	Отсек диз.	С 55 до 138	9
Р.М. Петриченко	6ЧН 12/14	С 80 до 110	6,2
Р.М. Петриченко	415/15	С 80 до 110	3,5
В.Н. Поляков	Д-50	С 80 до 120	9,5

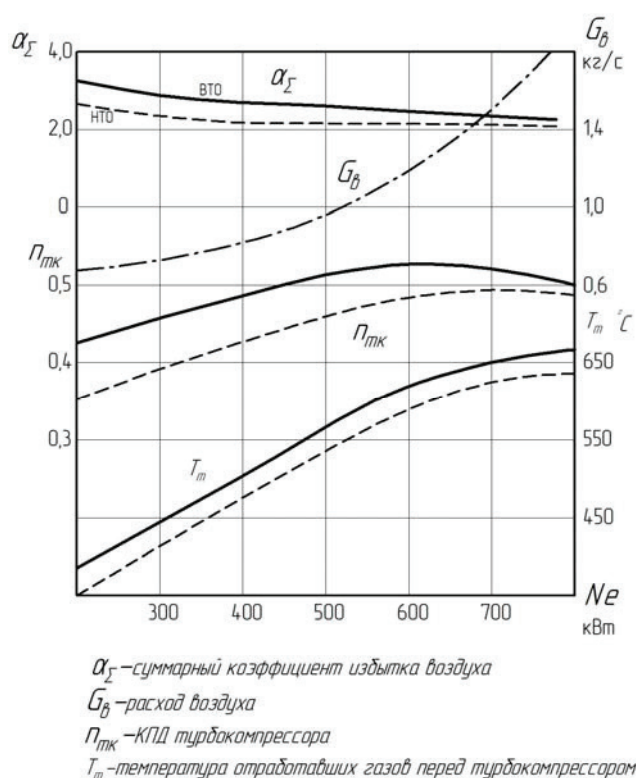


Рисунок 2 – Изменение показателей рабочего процесса дизеля 6ЧН 21/21 при его переводе на высокотемпературное охлаждение

На рисунке 2 представлены экспериментальные данные [1] влияния температуры охлаждающей воды на параметры рабочего процесса дизеля 6ЧН 21/21.

Интересные результаты по влиянию ВТО на основные параметры рабочего процесса приведены в работах [1, 6]. Так, для двигателя 12ЧН 18/20 при увеличении температуры охлаждающей воды от 343 до 393К (с 70 до 120 °С), жесткость процесса сгорания ($dp/d\phi$) изменяется с 0,5 до 0,32 МПа/град, т. е. на 40 %, а максимальное давление сгорания уменьшается с 6,6 до 6,05 МПа (10 %).

Для двигателя Д50 при повышении температуры охлаждающей воды с 353...393К (80 до 120 °С), коэффициент наполнения снизился на 30 %, период задержки воспламенения снизился на 2 град. п.к.в., максимальное давление цикла снизилось на 0,35 МПа. В то же время возросла максимальная температура цикла на 40 °С.

В этих работах, а также в ряде других публикаций отмечается, что при переходе от обычного охлаждения к ВТО, по мере роста температуры охлаждающей жидкости сначала происходит улучшение рабочего процесса и снижение расхода топлива, а после достижения оптимальной (с точки зрения минимального расхода топлива) температуры, по мере роста температуры охлаждающей жидкости, рабочий процесс ухудшается. Причем для каждого двигателя существует своя определенная температура. Как уже отмечалось выше, применение ВТО приводит к повышению общего уровня температуры деталей и узлов двигателя. Улучшение технико-экономических показателей силовых установок с двигателями можно проследить на следующих примерах.

Исследования по переводу дизеля 8ЧН 26/26 на ВТО показали, что при повышении температуры охлаждающей воды с 363 до 388К (с 90 до 115 °С) общее число водяных и масляных секций радиаторов можно сократить в 1,3 раза, то есть на 30 %.

Для дизеля Д70 применение ВТО позволило сократить поверхность радиаторов на 34 % [4], например, для тепловозных двигателей это весьма существенная величина, так как радиаторы занимают 1/5 длины тепловоза.

Рассмотрим его влияние на основные системы, узлы и детали двигателя и как это может сказаться на технических и экономических характеристиках двигателя.

Система смазки. Повышение уровня температуры масла приводит к снижению его вязкости. С одной стороны, при этом снижаются энергетические затраты на прокачивание масла через зазоры двигателя, но с другой стороны, снижение вязкости приводит к выдавливанию масла из зазоров трущихся пар, снижению нагрузочной способности масляного клина и быстрому износу трущихся пар. Это снижает срок службы деталей и узлов, более частую их замену и повышение эксплуатационных затрат на ремонт. В то же время повышение температуры масла приводит к быстрому выпадению из него присадок и ускоренному «старению» масла, что приводит к частой его замене. Для снижения температурного уровня масла вынуждены устанавливать радиаторы с увеличенной поверхностью теплообмена.

Цилиндро-поршневая группа. Повышение температуры зеркала цилиндра приводит к повышению температуры пленки масла. Это снижает его вязкость и потери на трение в ЦПГ. Но одновременно снижается прочность масляной пленки. В результате может произойти ее разрыв от действия сил упругости поршневых колец. После чего наступает режим полусухого трения, который сопровождается не только увеличением потерь на трение, но и увеличением износа трущихся поверхностей. Кроме механического износа, существует и коррозионный износ зеркала цилиндра, обусловленный наличием серы в топливе, образующей при сгорании сернистый ангидрид, который взаимодействуя с парами воды, образует серную кислоту.

В работе [6] приведен анализ влияния повышенного температурного режима охлаждающей жидкости, в том числе и высокотемпературного, на величину износа деталей цилиндро-поршневой группы разных ДВС.

А в работе [7] представлен анализ гидравлической схемы энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания и режимом ВТО.

Под действием высокого давления в цилиндре пары серной кислоты конденсируются при температурах более 423К (150 °С). А это значит, что при некоторых температурах возможна конденсация серной кислоты на поверхности зеркала цилиндра. В этом случае ВТО, повышая температуру деталей ЦПГ, позволяет снизить опасность коррозионного износа. Для поршня критические температуры имеют другие значения, но они не должны превышать температуры, при которых масло превращается в лак или нагар. Образование лака в полости охлаждения поршня вызывает его перегрев, а образование нагара в поршневых канавках вызывает «залегание» поршневых колец и их последующую поломку. Таким образом, ВТО может, как ухудшить техническое состояние двигателя, так и улучшить.

Газовыпускной тракт. Применение ВТО приводит к повышению температуры отработавших газов. В результате чего ухудшаются условия работы, в первую очередь, выпускных клапанов, омываемых ими. А также турбокомпрессора (если двигатель имеет газотурбинный наддув).

Ввиду высокой температуры выпускных клапанов (приближающейся к 873...973К (600...700 °С), даже незначительное ее увеличение (порядка 30–40 °С) приводит к резкому сокращению срока их службы.

Вопрос охлаждения выпускных клапанов является одним из самых сложных в настоящее время, и даже может ограничить применение ВТО на высокофорсированных двигателях.

Допускаемая температура отработавших газов для турбокомпрессоров (используемых в двигателестроении) вообще ограничена 923К (650 °С). Так что в высокофорсированных двигателях, имеющих температуру отработавших газов, близкую к указанной, возможно либо при снижении мощности двигателя, либо после принятия каких-то мер, снижающих температуру отработавших газов.

Элементы системы охлаждения. Об ухудшении технического состояния циркуляционных насосов говорилось выше. Кроме того, при температурах жидкости, близких к состоянию насыщения, в условиях вибрации двигателя усиливаются кавитационные процессы на стенках полости охлаждения и, в первую очередь, на стенках втулки и крышки цилиндра. В результате кавитационной эрозии сокращается срок службы втулки и крышки цилиндра, некоторые результаты исследований этому вопросу представлены в работе [8].

Уплотнительные детали. Посадка этих деталей выбрана с натягом так, чтобы не было подтекания жидкости в нерабочем (холодном) состоянии. Увеличение рабочей температуры приводит к увеличению натяга, и если возникающие при этом напряжения окажутся за пределом упругости, то после остановки двигателя может произойти разгерметизация системы охлаждения. В качестве уплотнительных элементов широко используют резиновые изделия. Повышенные температуры резины при ВТО сокращают срок их службы в результате её ускоренного старения. Как уже отмечалось, при ВТО происходит уменьшение тепловыделений в систему охлаждения. Это означает снижение тепловых потоков через втулку и крышку цилиндр, а значит и уменьшение в них температурных напряжений. Так что в этом случае происходит увеличение надёжности указанных деталей.

Таким образом, применение ВТО позволяет однозначно улучшить технико-экономические показатели, а именно уменьшение массы, габаритов и стоимости теплорассеивающих устройств и ряд других параметров, что подтверждается в работе [9].

Однозначно ухудшить условия работы других деталей: уплотнения, турбокомпрессора, циркуляционных насосов не позволяет конкретно определить изменение технического состояния остальных деталей и узлов. Это обстоятельство приводит к тому, что и оценка технико-экономического состояния двигателя при ВТО пока что может осуществляться индивидуально для каждого двигателя в результате его более детального обследования. Поэтому необходимо продолжить исследования в этом направлении.

Поступила: 06.06.22; рецензирована: 20.06.22; принята: 24.06.22.

Литература

1. *Ливенцов Ф.Л.* Системы высокотемпературного охлаждения ДВС / Ф.Л. Ливенцов. Л.: Машиностроение, 1968. 205 с.
2. *Разуваев А.В.* Поршневые двигатели внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением / А.В. Разуваев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2001. 128 с.
3. *Разуваев А.В.* Анализ возможности использования высокотемпературного охлаждения энергетических установок с ДВС / А.В. Разуваев, Н.А. Устинов, Н.В. Краснолудский, В.И. Бурлаков // Вестник КРСУ. 2021. Т. 21. № 1. С. 87–92.
4. *Разуваев А.В.* Повышение эффективности системы высокотемпературного охлаждения двигателей / А.В. Разуваев // Двигателестроение. 1999. № 2. С. 9–11.

5. *Яковлев Е.А.* Оптимальный температурный режим тепловозного дизеля / Е.А. Яковлев. М.: НИИИН-ФОРМТЯЖМАШ. Информ. лист 978-4-78-17. С. 6–7.
6. *Разуваев А.В.* Повышение эффективности энергетических установок / А.В. Разуваев, Е.А. Разуваева, Е.А. Соколова // Вестник Саратовского госуд. технич. ун-та. 2010. № 3. С. 150–159.
7. *Разуваев А.В.* Анализ гидравлической схемы энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания / А.В. Разуваев // Глобальная ядерная безопасность. 2020. № 3(36). М.: ВИТИ НИЯУ МИФИ. С. 73–77.
8. *Разуваев А.В.* Выявление причин неравномерности температуры зеркала цилиндра дизеля 6 ЧН 21/21 / А.В. Разуваев, Н.А. Устинов, Н.В. Краснолудский и др. // Вестник КРСУ. 2022. Т. 22. № 4. С. 45–51.
9. *Петриченко Р.М.* Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания / Р.М. Петриченко. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1975. 224 с.