

УДК 621.43
DOI: 10.36979/1694-500X-2024-24-4-95-101

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ ДИЗЕЛЯ 6 ЧН 21/21 С ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

А.В. Разуваев

Аннотация. Приведен анализ технической литературы по условиям работы двигателя внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением. Описана работа крышки цилиндра и проведен анализ по прогнозированию возможного предельного повышения уровня форсировки дизеля. Дополнительно к опубликованным данным по результатам термометрирования крышки и втулки цилиндра дизеля 6 ЧН 21/21, приведены величины и проведен анализ изменения температуры цельнолитого охлаждаемого поршня при работе дизеля с высокотемпературным охлаждением. Дана оценка повышения уровня температур поршня при изменении температуры охлаждающей воды до 390K (117 °C). Обоснована эффективность и целесообразность применения режима высокотемпературного охлаждения энергетической установки.

Ключевые слова: крышка цилиндра; втулка цилиндра; энергетическая установка; высокотемпературное охлаждение; термометрирование поршня.

ЖОГОРКУ ТЕМПЕРАТУРАДА МУЗДАТКЫЧЫ БАР 6 ЧН 21/21 ДИЗЕЛИНИН ИШТӨӨ ЖӨНДӨМДҮҮЛҮГҮН БААЛОО

А.В. Разуваев

Аннотация. Макалада жогорку температурада муздатуучу ички күйүү кыймылдаткычынын иштөө шарттары боюнча техникалык адабияттарга талдоо жүргүзүлдү. Цилиндрдин капкагынын иштеши сүрөттөлгөн жана дизелдик күчтүн деңгээлинин мүмкүн болгон максималдуу өсүшүн болжолдоо үчүн талдоо жүргүзүлдү. 6 ЧН 21/21 дизель цилиндридин капкагын жана втулкасын термометрлөөнүн жыйынтыктары боюнча жарыяланган маалыматтарга кошумча чондуктар келтирилген жана жогорку температурада муздаткычы бар дизель иштеп жатканда катуу муздатылган поршендин температурасынын өзгөрүшүнө талдоо жүргүзүлгөн. Муздатуучу суунун температурасы 390K (117 °C) чейин өзгөргөндө поршендин температурасынын деңгээлинин жогорулашына баа берилди. Энергетикалык орнотмонун жогорку температурада муздатуу режимин колдонуунун натыйжалуулугу жана максатка ылайыктуулугу негизделген.

Түйүндүү сөздөр: цилиндр капкагы; цилиндр жеңи; энергетикалык орнотмо; жогорку температурада муздатуу; поршень термометриясы.

DIESEL PERFORMANCE ASSESSMENT 6 CHN 21/21 HIGH TEMPERATURE COOLING

A.V. Razuvaev

Abstract. The article provides an analysis of the technical literature on the operating conditions of the internal combustion engine with high-temperature cooling. The operation of the cylinder cover is described and an analysis is carried out to predict a possible marginal increase in the level of diesel boost. In addition to the published data of the thermometer results the lids and bushings of the cylinder of the diesel engine 6 CHN 21/21 are presented and the changes in temperature of the solid-cast cooled piston during the operation of the diesel engine with high-temperature cooling are analyzed. The assessment of the increase in the level of piston temperatures with a change in the temperature of the cooling water to 390K (117 °C) is given. At the same time, the efficiency and expediency of using the high-temperature cooling mode of the power plant are substantiated.

Keywords: cylinder cover; cylinder bushing; power plant; high temperature cooling; piston thermometry.

Основными задачами современного дизелестроения является создание надежных, долговечных, экономичных, обладающих малыми массогабаритными показателями дизелей.

Одним из способов повышения эксплуатационной экономичности и уменьшения массогабаритных показателей дизельных энергоустановок (ЭУ) является применение высокотемпературного охлаждения (ВТО). Этот режим отличается от штатного тем, что при нем температура охлаждающей жидкости на выходе из двигателя имеет величину более 373К (100 °С).

Впервые двигатели внутреннего сгорания (ДВС) с 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.

Интерес к ВТО обусловлен еще и тем, что на машиностроительном заводе (г. Балаково) проводились работы по созданию дизеля 12 ЧН 21/21, форсированного до среднего эффективного давления $P_{me} = 1,6$ МПа при частоте вращения $n = 1500$ мин⁻¹ с системой ВТО для тепловоза с уменьшенной нагрузкой на ось. На этом основании проводили ряд опытно-конструкторских работ по обеспечению режима ВТО для двигателей типа ЧН 21/21.

Следует отметить, что ДВС с различной конструкторской и технологической разработкой, но с режимом ВТО имеют различные снижения теплоотвода в охлаждающую жидкость от 5 до 24 процентов [1]. Это обстоятельство дает основание считать, что при переводе конкретного типа ДВС на режим ВТО требуется и проведение конкретных исследовательских работ для этого типа двигателя.

Проведенные в этом направлении работы представлены в научно-технической литературе для ДВС типа ЧН 21/21. Так применение режима ВТО на дизеле 6 ЧН 21/21 позволит повысить его экономичность в диапазоне нагрузок 0–30 % от номинальной на 3–8 %, снизить габаритные показатели радиаторных установок на ~10–15 %, повысить эффективность применения систем утилизации вторичной теплоты [2]. Здесь же приведены режимы работы различных энергоустановок и обосновано применение режима ВТО на ДВС. Это позволяет повысить эксплуатационную экономичность всей энергоустановки [3].

В работе [4] приводится анализ научно-технической отечественной и зарубежной литературы по повышению эффективности энергоустановок на базе ДВС за счет повышенного температурного режима системы охлаждения, в том числе и с высокотемпературным охлаждением во всем рабочем диапазоне нагрузок ЭУ. В этой же работе обосновывается целесообразность применения режима ВТО практически на всех режимах работы двигателя за счет снижения износа деталей цилиндро-поршневой группы.

Аналогичные данные имеются и в работе [5], где «Предварительные расчеты на основе опубликованных экспериментальных данных показывают, что применение ВТО, обеспечивающей поддержание на всех режимах работы ДВС температуры наиболее нагретых деталей, ограждающих камеру сгорания на уровне температуры на режиме номинальной мощности, приводит к повышению эффективного КПД на режимах частичных нагрузок и значительному повышению требуемого давления в системе охлаждения. Предложено, что система ВТО должна обеспечивать поддержание на всех режимах работы ДВС температуры наиболее нагретых деталей, ограждающих камеру сгорания на оптимальном уровне, обеспечивающем повышение эффективного КПД при допустимом уровне повышения давления в системе охлаждения, за счет ограничения допустимой температуры охлаждающей жидкости на режимах малых нагрузок».

В работе [6] проанализирован расширенный комплекс показателей, необходимых для оценки надежной работы дизеля, и «рассмотрены экспериментальные исследования условий работы цилиндро-поршневой группы дизеля 6 ЧН 21/21 производства Балаковского машиностроительного завода. Представлены результаты исследований температуры по высоте и сторонам цилиндра с учетом водораспределения в данной секции блока цилиндров. Обоснована возможность работы двигателя с системой

высокотемпературного охлаждения, что позволяет повысить эффективность работы энергоустановки с ДВС».

Что касается крышки цилиндра, как одной из ответственных деталей цилиндрично-поршневой группы (ЦПГ) двигателя, представляют интерес работы [7, 8] в которых «представлена актуальность повышения эффективности энергетических комплексов на базе двигателей внутреннего сгорания. В связи с этим, рассмотрена и проанализирована возможность применения системы высокотемпературного охлаждения двигателя внутреннего сгорания в энергетической установке, используя ее положительный эффект. Представлен анализ экспериментальных данных по замеру температур огневого днища крышки цилиндра и параметров материалов в зависимости от их рабочей температуры. Полученные экспериментальные данные по уровню температур огневого днища крышки цилиндра позволили спрогнозировать ограничения по повышению агрегатной мощности форсированного ДВС». Это также касается двигателя 6 ЧН21/21.

Что касается втулки цилиндра, то более подробные данные по ней приведены в работе [9], где «представлены результаты исследования особенностей теплообмена при поверхностном кипении недогретой жидкости с учетом её вынужденного движения.

Предложены критерии определения работоспособности ответственной детали ДВС – втулки цилиндра. Приведены величины критериев работоспособности втулки цилиндра дизеля 6 ЧН21/21 при $P_{me} = 1,61$ МПа и различной температуре охлаждающей жидкости на выходе из него». Результаты анализа работы этой втулки цилиндра приведено в работе [10].

Кроме этого, требуется и модернизированная система охлаждения для обеспечения режима ВТО. Такая система была разработана совместно с коллективом специалистов и представлена в работе [11]. Эта система была проверена на экспериментальном стенде с дизелем 6 ЧН21/21, и показала себя только с лучшей стороны. Основные результаты исследований приведены в работах [2, 12]. В качестве одного из основных показателей работы системы ВТО, необходимо отметить стабильность ее работы во всем температурном диапазоне с учетом режима ВТО, а также ее работу без отказов всей системы охлаждения в процессе стендовых испытаний. Испытания проводили не один десяток часов в том числе и теплосбалансовые испытания, а также проводили работы по термометрированию основных деталей цилиндрично-поршневой группы дизеля. При этом было отмечено, что штатный водяной насос дизеля обеспечивается необходимой величиной кавитационного запаса, что способствует стабильной работе системы охлаждения с ВТО.

Представляет интерес и альтернативное техническое решение по организации системы ВТО, данные которых приведены в работе [13], где «предложены и обоснованы такие направления модернизации систем охлаждения, как переход на высокотемпературное охлаждение, регулирование свойств охлаждающей жидкости, совершенствование автоматического регулирования параметров охлаждения, связанное с управлением параметрами систем охлаждения и газотурбинного наддува. Определена совокупность мероприятий, необходимых для проведения модернизации».

Перевод ДВС на режим ВТО и используя методику расчета систем утилизации теплоты [14], можно снизить массогабаритные показатели применяемых теплообменников за счет увеличенных температурных напоров теплоносителей.

Повышение температуры охлаждающей жидкости до режима ВТО на ДВС в составе транспортной энергетической установки [2, 15], позволит дополнительно поднять ее эффективность в условиях эксплуатации, например, в составе миниТЭЦ [16], что позволит повысить эффективность работы систем энергоснабжения автономного объекта [17].

Цель данной работы – исследование температурного состояния поршня данной конструкции в условиях режима ВТО, как одной из ответственных деталей ЦПГ и всего ДВС.

Поршень цельнолитой конструкции имеет внутренний канал для циркуляции охлаждающего масла. Поршень изготавливается из алюминиевого литейного сплава АЛ 25. Этот сплав применяется для изготовления фасонных отливок, в том числе и поршней для двигателей. Механические свойства

алюминиевого литейного сплава зависят от степени чистоты, вида и режимов его обработки, температуры и других факторов. Отмечается, что с возрастанием температуры материала прочность и твердость алюминия уменьшается, а пластичность возрастает. Так σ_b – временное сопротивление разрыву (предел прочности при растяжении), МПа уменьшается от 74,4 МПа при 293К (20 °С) до 37,3 МПа при 573К (300 °С), т. е. в два раза. Эти показатели дают основание считать, что остается не решенным вопрос о надежности работы дизеля с ВТО с данной конструкцией поршня. В периодической печати наиболее часто встречается утверждение, что применение ВТО приводит к снижению теплонапряженности. Это не совсем верно, так как понятие «теплонапряженность» охватывает не только действующие в деталях температурные напряжения, но и абсолютные значения температур. Их соотношения связаны с такими критическими температурами как с температурой лако- и нагарообразования, температурой разрыва масляной пленки и т. д.

Приведены результаты экспериментальных исследований величин температур алюминиевого поршня двигателя при высокотемпературном охлаждении. Исследования проводили на двигателе 6 ЧН 21/21 при частоте вращения коленчатого вала $n = 25 \text{ с}^{-1}$ (1500 об/мин) и мощности 735 и 882 кВт. В результате экспериментальных исследований были получены температурные поля серийного цельнолитого алюминиевого охлаждаемого маслом поршня при различных температурах охлаждающей воды на выходе из дизеля, которая ступенчато изменилась от 356К (83 °С) до 390К (117 °С).

Результаты термометрирования показали, что увеличение температуры в характерных точках поршня составили:

- днище поршня – 25–30 °С;
- боковая поверхность головки поршня и зона над верхним компрессионным кольцом – 25–30 °С;
- верхняя часть тронка поршня (под компрессионными кольцами) – 25–30 °С;
- нижняя часть юбки поршня – 15 °С.

Таким образом, было установлено, что повышение температуры охлаждающей воды на выходе из дизеля на 34 °С привело к росту температуры поршня в среднем на 25–30 °С или к снижению предела прочности при растяжении материала поршня на 3,98 МПа (оценка дана по средней величине снижения предела прочности при растяжении материала на каждый градус увеличения его температуры). При этом необходимо отметить, что технологическая температура заливки поршня из данного материала составляет 973К (700 °С), а максимальная температура поршня достигает 593–603К (320–330 °С).

При повышении температуры охлаждающей воды было отмечено некоторое выравнивание температур по окружности поршня. Эскиз поршня с точками замера температуры на нем представлен на рисунке 1.

На рисунках 2 и 3 приведены графики изменения температуры в характерных точках поршня в зависимости от температуры охлаждающей воды и при соответствующей мощности двигателя.



Рисунок 1 – Эскиз поршня с точками замера температуры

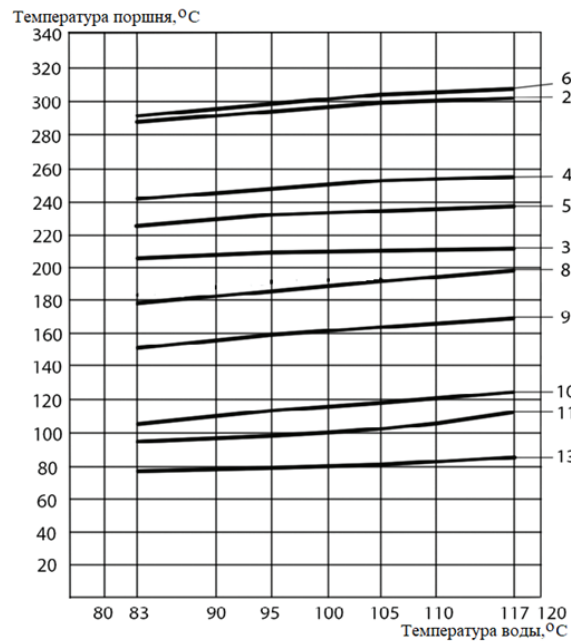


Рисунок 2 – Результаты термометрирования поршня в зависимости от температуры воды на выходе из дизеля при нагрузке $P_e = 735$ кВт и $n = 25$ с⁻¹

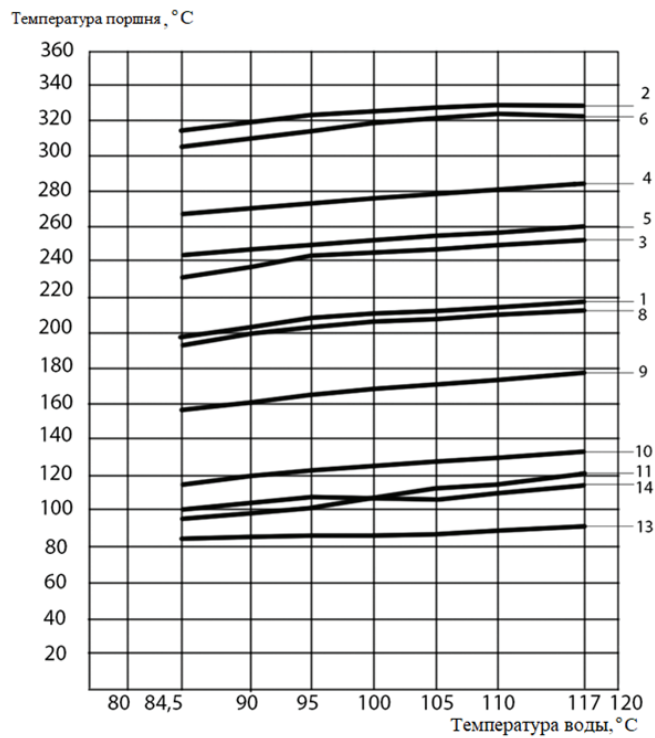


Рисунок 3 – Результаты термометрирования поршня в зависимости от температуры воды на выходе из дизеля при нагрузке $P_e = 882$ кВт и $n = 25$ с⁻¹

Точки с номерами позиций соответствуют точкам замера температур. Номера позиций с правой стороны рисунка соответствуют номеру точки замера температуры поршня согласно рисунку 1.

Номера позиций с правой стороны рисунка соответствуют номеру точки замера температуры поршня согласно рисунку 1.

Анализ результатов термометрирования поршня свидетельствует о том, что повышение температуры охлаждающей воды от 356К (83 °С) до 378К (105 °С) незначительно увеличивает температуру поршня, и даже в зоне расположения верхнего компрессионного кольца её величина не превышает допустимых значений. Это обстоятельство можно объяснить тем, что в этом интервале повышения температуры воды, температура масла, поступающего на охлаждения поршня, изменяется незначительно. Дальнейший рост температуры охлаждающей воды приводит к более существенному росту температуры масла, что увеличивает темп роста температуры поршня.

Рост температуры поршня сопровождается снижением доли тепла, отводимого от поршня в охлаждающее масло. Уменьшение доли тепла имеет место только за счёт пропорционального уменьшения разности температур между верхней поверхностью поршня и охлаждающем маслом.

Анализ экспериментальных исследований по результатам термометрирования характерных точек поршня дизеля позволяет сделать следующие выводы:

1. Рост температуры охлаждающей воды до 378К (105 °С) не вызывает повышения температуры наиболее ответственных участков поверхности поршня сверх допустимых пределов.

2. Дальнейший рост температуры охлаждающей воды до 390К (117 °С) способствует повышению температуры в зоне расположения верхнего компрессионного кольца сверх допустимых значений. В связи с этим, при $T_{cool} = 390\text{К}$ (117 °С) мощность, развиваемая двигателем, должна быть ограничена до $P_e = 735$ кВт, или использован поршень другой конструкции (например, составной с днищем из жаропрочной стали).

3. При переходе к ВТО двигателя необходимо довести геометрию верхней части поршня в направлении некоторого увеличения его конусности, что позволит компенсировать дополнительное температурное расширение вследствие увеличения температуры.

4. Увеличение температуры поршня с применением ВТО приводит к снижению предела прочности при растяжении материала поршня примерно в два раза.

Результаты проведенных исследований позволили сделать следующие **выводы**:

Получены новые данные по величине температур предложенной конструкции поршня на дизеле 6 ЧН 21/21 с режимом ВТО, которые позволяют ограничить мощность ЭУ с этим дизелем на режиме ВТО до $P_e = 735$ кВт, хотя другие детали ЦПГ (крышка и втулка цилиндра) позволяют иметь более высокую мощность, равную $P_e = 882$ кВт.

Результаты экспериментальных исследований дизеля 6 ЧН 21/21 с ВТО позволили провести анализ работы в данной конкретной комплектации (комплектация с алюминиевым поршнем) и получить практические значимые выводы по необходимости проведения его модернизации. Полученные данные и практические результаты исследований дизеля 6 ЧН 21/21 с ВТО могут быть адаптированы к уже имеющимся в производстве дизелям других конструкций и комплектаций.

Результаты экспериментов нашли практическое применение в доводке дизелей типа ЧН 21/21 на машиностроительном заводе и показали актуальность и эффективность применения режима ВТО.

Поступила: 14.09.23; рецензирована: 28.09.23; принята: 02.10.23.

Литература

1. *Разуваев А.В.* Режим высокотемпературного охлаждения двигателей внутреннего сгорания / А.В. Разуваев, Н.В. Краснолудский, Д.А. Костин // Вестник КРСУ. 2022. Т. 22. № 8. С. 34–41.
2. *Разуваев А.В.* Поршневые двигатели внутреннего сгорания с высокотемпературным охлаждением / А.В. Разуваев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2001. 128 с.

3. Разуваев А.В. Повышение эксплуатационной экономичности энергетических установок / А.В. Разуваев, Е.А. Соколова, И.М. Воронов, Е.А. Разуваева // Нефть и газ. 2008. № 5/Н (73). С. 95–97.
4. Разуваев А.В. Повышение эффективности энергетических установок / А.В. Разуваев, Е.А. Разуваева, Е.А. Соколова // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. 2010. № 3. С. 150–159.
5. Дискин М.Е. Высокотемпературное охлаждение двигателей внутреннего сгорания на режимах частичных нагрузок // Вестник Евразийской науки. 2018. № 2. Том 10.
6. Разуваев А.В. Износ деталей цилиндро-поршневой группы двигателя с системой высокотемпературного охлаждения в энергоустановках / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, М.С. Губатенко // Вестник КРСУ. 2019. Т. 19. № 8. С. 45–48.
7. Косырев С.П. Теплонапряженность цилиндровой крышки высокофорсированного дизеля / С.П. Косырев, А.В. Разуваев, Р.М. Рафиков // Двигателестроение. 2002. № 2.
8. Разуваев А.В. Свойства материалов, сдерживающих применение форсированных ДВС в энергетических комплексах / А.В. Разуваев, Е.Н. Слободина // Матер. XII межд. IEEE научно-технической конференции «Динамика систем, механизмов и машин», Омск, 13–15 ноября 2018 г. Омск: ОмГТУ, 2018. Т. 6. № 3. С. 160–164.
9. 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. № 12. С. 87–92.
10. 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.
11. Ким Ф.Г., Синатов С.А., Орлов А.Н., Гулин С.Д., Разуваев А.В., Устинов Н.А., Тимохин К.А. Система охлаждения ДВС. А.с. № 1321862, F 01 P 3/22, Бюлеть № 25, 07.07.87.
12. Разуваев А.В. Анализ гидравлической схемы энергоустановок с двигателями внутреннего сгорания // Глобальная ядерная безопасность. 2020. № 3(36). ВИТИ НИЯУ МИФИ. С. 73–77.
13. Жуков В.А. Перспективы совершенствования систем охлаждения судовых дизелей / В.А. Жуков // Вестник ГУМРФ им. адмирала С.О. Макарова. 2015. № 4 (32). С. 131–137.
14. Гребнев В.М. Метод расчета системы утилизации теплоты стационарной энергетической установки / В.М. Гребнев, А.В. Разуваев, Д.А. Костин // Двигателестроение. 2013. № 4. С. 37–41.
15. Разуваев А.В. Условия работы плунжера регулятора энергетической установки тепловоза / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, В.А. Глухарев // Вестник КРСУ. 2018. Т. 18. № 8. С. 59–62.
16. Разуваев А.В. Повышение надежности узлов и деталей ДВС, входящих в состав миниТЭЦ / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, Т.И. Перелыгина // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 60–63.
17. Разуваев А.В. Повышение эффективности систем энергоснабжения автономного объекта / А.В. Разуваев, Д.А. Костин // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 9. С. 60–63.