

# МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СЕМЕЙСТВА ЯМЗ С ЦЕЛЬЮ УМЕНЬШЕНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ РАЗРУШЕНИЙ

к.п.н. Стрельцов Р.В., к.т.н. Васильев В.Г., Арабян А.К., Мамошин А.И.  
Пермский военный институт войск национальной гвардии России, Пермь, Россия  
Streltsov86@rambler.ru

*В статье рассматриваются вопросы, связанные с модернизацией дизельных двигателей для уменьшения их кавитационных разрушений. В процессе эксплуатации дизельных двигателей могут возникать местные разрушения, как правило, причинами данных разрушений могут являться вибрации стенок полостей охлаждения дизелей, вследствие чего возникают разрывы жидкости, что приводит к повышению давлений, температур и разности потенциалов в охлаждающей сфере. Данные факторы оказывают разрушающее влияние на поверхности деталей, омываемые охлаждающей жидкостью. Для поддержания нормального теплового режима требуется отводить избыток тепла от нагретых деталей, для этого и предназначена система охлаждения. Одним из перспективных направлений развития указанной системы становится повышение средней температуры охлаждающей жидкости в водяном тракте двигателей внутреннего сгорания выше 100°C с соответствующим повышением давления в зарубашечном пространстве, которое исключает вскипание воды. С повышением температуры охлаждающей жидкости снижается доля теплоты, уносимой с охладителем, а также уменьшается период задержки самовоспламенения, становятся меньше степень повышения давления при сгорании, что положительно сказывается на долговечности деталей двигателя. При анализе надежности работы жидкостного контура необходимо учитывать, что эффективность насоса в значительной степени зависит от температуры охлаждающей жидкости. При температуре охлаждающей жидкости близкой к температуре кипения теплоносителя, возникают кавитационные явления, выражающиеся в резком падении производительности насоса из-за появления в жидкости пузырьков воздуха и пара. Становится трудным обеспечение безкавитационной работы водяного насоса. Кавитация в проточной части насоса зачастую приводит к нарушению циркуляции охлаждающей жидкости в тракте и перегреву дизеля. Включение в водяной тракт системы высокотемпературного охлаждения смешительно-подпорного устройства параллельно водяному насосу – один из наиболее простых и эффективных способов увеличения располагаемого кавитационного запаса насоса.*

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, система охлаждения, модернизация, кавитационное разрушения, высокотемпературное охлаждение, насос.

## Введение

Автомобильный транспорт нашей страны продолжает быстро развиваться: совершенствуется и видоизменяется конструкция транспортных средств, расширяется номенклатура подвижного состава, растет численность автомобильного парка. Вместе с этим увеличиваются затраты на автомобильное топливо. Доля потребляемого нефтяного топлива достигла 30 %. Поэтому мероприятия, направленные на сбережение энергоресурсов и сокращение потребления жидких нефтепродуктов на автомобильном транспорте стоит очень остро. Не менее важной является и проблема снижения загрязнения окружающей среды токсичными компонентами отработавших газов.

При эксплуатации дизельных двигателей наблюдаются случаи, когда со стороны водяной полости начинается местное весьма интенсивное разрушение. При форсировании дизелей по среднему эффективному давлению, частоте вращения коленчатого вала и при уменьшении массогабаритных показателей разрушения поверхностей, омываемых охлаждающей жидкостью, может возрасти, сокращая сроки службы дизеля. Это разрушение встречается в следующих местах:

- в гильзах и блоках в полости качания шатуна;
- в нижних и верхних посадочных поясах, в узких полостях;
- в районах отвода и подвода жидкости в блоки дизеля;

– в наружной поверхности гильз и блоков или их отдельных частях в районах сопряжения различных материалов.

Причиной кавитационных разрушений является вибрация стенок полостей охлаждения дизелей, в результате которой возникают разрывы жидкости и их уничтожение, приводят к местным повышениям давлений, температур и разности потенциалов в охлаждающей сфере. Эти факторы оказывают разрушающее влияние на поверхности, омываемые охлаждающей жидкостью.

Рабочий цикл двигателей внутреннего сгорания сопровождается периодическим повышением температуры рабочего тела в цилиндре, а надежная и длительная работа механизмов двигателя возможна только при строго определенном тепловом состоянии. Перегрев приводит к тепловому расширению и возможной потере подвижности деталей, коксованию масла, разрушению деталей, ухудшению наполнения цилиндров.

Такое состояние двигателя, при котором температура основных деталей способствует эффективному протеканию рабочего процесса и в тоже время обеспечивает их высокую работоспособность, называют нормальным тепловым режимом. Для его поддержания требуется принудительно отводить избыток тепла от нагретых деталей. Для этого и предназначена система охлаждения.

Расширение производства дизелей с высокими технико-экономическими показателями затруднено без дальнейшего прогресса в области совершенствования систем, обслуживающих двигатели. Это в полной мере относится и к системе жидкостного охлаждения дизельных двигателей, предназначенной для охлаждения, а также для снижения теплонапряженности деталей до допустимых пределов и обеспечения оптимального теплового режима работы двигателя [1].

Одним из перспективных направлений развития указанных систем становится повышение средней температуры охлаждающей жидкости в водяном тракте двигателей внутреннего сгорания выше 100 °С с соответствующим повышением давления в зарубашечном пространстве, исключая вскипание воды.

### **Цель исследования**

Целью исследования является модернизация системы охлаждения дизельных двигателей семейства ЯМЗ с целью уменьшения кавитационных разрушений.

### **Материалы, методы исследования и обсуждение результатов**

Статистические данные показывают, что средняя температура охлаждающей жидкости в системах охлаждения непрерывно повышается, а за последнее время средняя температура в системах охлаждения бала повышена с 40...60 °С до 80...90 °С, а у некоторых двигателей она приближается к 100°С. Возникает вопрос, является ли температура 100 °С предельной. Ответ на этот вопрос может быть дан только при наличии достаточных данных, накопленных в результате всесторонних исследований большого числа различных типов двигателей, имеющих высокотемпературное охлаждение.

С повышением температуры охлаждающей жидкости снижается доля теплоты, уносимой с охладителем. Экспериментально установлено, что увеличение температуры охладителя на каждые 10 °С снижает теплоотдачу на 3...4 % [2]. В результате роста температуры масла уменьшается трение во всех сопряжениях и механический коэффициент полезного действия установки растет. Его прирост равняется 4...4,7 % на каждые 10 °С. Причем он повышается не беспредельно, а только до достижения температуры в системе охлаждения 120 °С. Улучшается протекание рабочего цикла (особенно на частичных нагрузках). С повышением температуры охлаждающей жидкости уменьшается период задержки самовоспламенения, что приводит к более мягкой работе дизеля, становятся меньше степень повышения давления при сгорании, что положительно сказывается на долговечности деталей двигателя.

По данным исследователей [3] при высокотемпературном охлаждении от двигателя может быть получена такая же мощность, как от двигателя с обычным охлаждением, но при меньшем часовом, а следовательно, и удельном расходе топлива, что является существенным преимуществом высокотемпературного охлаждения. Улучшение экономичности является следствием более полного сгорания топлива, что подтверждено результатами химического анализа.

У дизелей с высокотемпературным охлаждением экономия топлива может достигать 15...18 % на каждые 10 °С повышения температуры охлаждающей жидкости [4].

На автомобильных двигателях полностью преобразовать тепловую энергию в механиче-

скую сложно, так как это вызовет установку на двигатель различных вспомогательных агрегатов и устройств, что повлечет за собой неудобства при установке двигателя на транспортное средство. И все же уменьшение теплоотвода от системы охлаждения, вызванное повышенным тепловым режимом работы двигателя позволяет высвободить мощность, затрачиваемую двигателем на привод вентилятора системы охлаждения.

Анализируя надежность работы жидкостного контура, следует иметь в виду, что эффективность насоса в значительной степени зависит от температуры охлаждающей жидкости. В частности, при температуре охлаждающей жидкости близкой к температуре кипения теплоносителя могут возникать кавитационные явления, выражающиеся в резком падении производительности насоса из-за появления в жидкости пузырьков воздуха и пара. Становится трудным обеспечением безкавитационной работы водяного насоса. Кавитация в проточной части насоса может привести к нарушению циркуляции охлаждающей жидкости в тракте и перегреву дизеля.

Для надежной работы жидкостного контура в случае повышения теплового режима необходимо, чтобы давление в любой его точке было выше давления паров при данной температуре на величину кавитационного запаса.

Как следует из рис. 1, иллюстрирующего изменение давления (кривые а, б, в) в различных точках жидкостного контура двигателя при различных температурах охлаждающей жидкости  $t'$ , наименьший кавитационный запас  $\Delta H$  наблюдается на входе в насос, где давление из-за гидравлического сопротивления радиатора имеет минимальное значение. Средний кавитационный запас существенно снижается также при увеличении общего гидравлического сопротивления системы и, в частности, при установке термостатов с недостаточной пропускной способностью.

Работа системы охлаждения устойчива только в том случае, когда центробежный насос работает при достаточном запасе давления на всасывающей линии. Если давление на входе в насос понизится до давления парообразования всасываемой жидкости, то начнется вскипание жидкости (кавитация), и нормальная работа насоса будет нарушена. В связи с этим минимальное давление в насосе должно быть выше давления парообразования всасываемой жидкости.

Анализ работы систем охлаждения показывает, что это условие в ряде двигателей не выполняется [1].

Увеличить давление на входе в насос можно:

- увеличением высоты расположения охладителя (радиатора);
- снижением скорости движения жидкости за счет увеличения диаметра всасывающей трубы;
- снижением сопротивления всасывающего трубопровода и охладителя (радиатора) [5].

В том случае, когда двигатель работает при высоких температурах охлаждающей жидкости, для повышения давления на входе в насос целесообразна установка диффузора (подпорного узла) в месте присоединения компенсационной трубки.

Как видно из рис. 2, компенсационная трубка (КТ) присоединяется к горловине диффузора (сечение 1–1). Давление в горловине равно давлению, которое имеет место на входе в насос (Н) у систем с компенсационными контурами. Давление на выходе из диффузора (сечение 2–2) выше, чем в горловине (сечение 1–1), за счет превращения скоростной энергии в энергию давления.

Также необходимо учитывать возможность роста теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы, что сказывается на температуре масла в двигателе. 50...60 % теплоты,

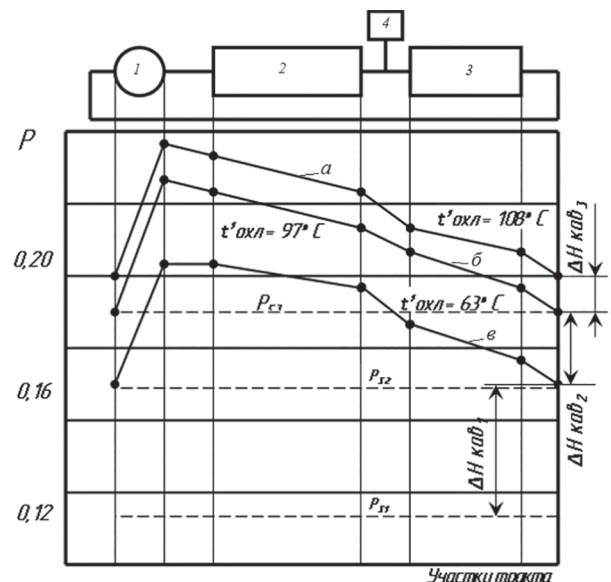


Рис. 1. Давление в отдельных точках закрытой системы охлаждения двигателей при различной температуре жидкости на входе в насос:

1 – насос; 2 – двигатель; 3 – радиатор; 4 – паровой клапан;  $P_s$  – давление насыщенного пара

которая не уносится системой охлаждения, забирается системой смазки. Поэтому при применении высокотемпературного охлаждения дизеля потребуются допустить некоторые увеличение температуры масла и, возможно, дополнительное его охлаждение.

Повышение температуры в системе охлаждения сопровождается повышением давления насыщенных паров охлаждающей жидкости, что в свою очередь повышает вероятность вскипания жидкости, циркулирующей в системе охлаждения.

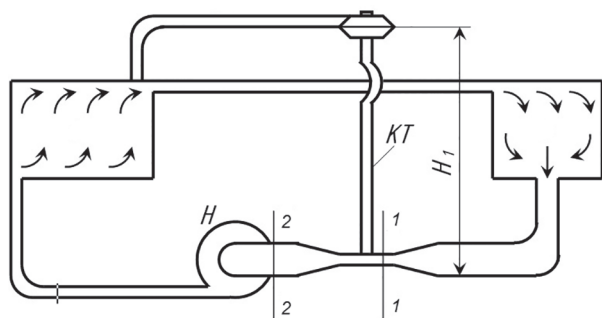


Рис. 2. Схема системы охлаждения с диффузором

Наличие пузырьков пара в охлаждающей жидкости может привести к снижению производительности водяного насоса, которое может привести к перегреву двигателя.

Кроме того, кавитация отрицательно влияет на состояние таких деталей как крыльчатка водяного насоса, корпус водяного насоса, гильзы цилиндров и так далее.

Вместе с тем, повышение температуры охлаждающей жидкости при неизменных конструкциях водяного тракта, напора и подаче насоса возможно лишь при достаточно большом значении действительного (располагаемого) кавитационного запаса насоса, превышающем значение его критического (требуемого) запаса не менее чем в 1...1,5 раза.

Требуемый кавитационный запас определяется конструкцией насоса, его параметрами и представляет собой минимально допустимую разность между удельной энергией потока на входе в рабочее колесо при данной подаче и энергией, соответствующей давлению насыщенных паров перекачиваемой охлаждающей жидкости при данной температуре.

В настоящее время применяется несколько способов борьбы с кавитацией водяного насоса.

Располагаемый кавитационный запас можно повысить, если сократить длину всасывающего тракта и увеличить диаметр подводящего

патрубка. Однако изменение размеров всасывающей магистрали ограничено условиями компоновки системы охлаждения и взаимосвязи отдельных элементов водяного тракта.

Этот способ не может быть приемлем для проектируемого дизеля, так как потребует пересчета параметров водяного насоса и изменения конструкций некоторых деталей двигателя.

Можно создать подпор в подводящем патрубке водяного насоса, если поместить расширительный бачок выше, чем в штатной системе охлаждения. Тогда высота его установки более чем в три раза превысит то же значение из штатной системы охлаждения. Делать это не позволяют условия компоновки дизеля на транспортном средстве.

По известным причинам неприемлемы также возможные варианты создания искусственного подпора от постоянного источника сжатого воздуха с целью повышения давления охлаждающей жидкости в подводящем патрубке водяного насоса.

Не может быть признан удачным и проектируемый некоторыми заводами изготовителями дизелей способ создания подпора за счет перепуска части охлаждающей жидкости с повышенным давлением из линии нагнетания в подающий патрубок водяного насоса, так как это связано с необходимостью увеличения подачи насоса почти на 60 % и соответственно затрат мощности на его привод.

Возможен вариант включения в контур системы высокотемпературного охлаждения вспомогательного центробежного насоса для обеспечения подпора в подводящем патрубке основного циркуляционного насоса. Однако при этом возникает задача обеспечения безкавитационной работы уже вспомогательного насоса, да и установка на двигатель второго насоса вызовет определенные сложности.

Особого внимания заслуживает схема для замкнутых систем высокотемпературного охлаждения двигателей внутреннего сгорания, предложенная Соколовым Е.А., Зингер Н.М. [3]. Это схема системы высокотемпературного охлаждения с использованием смесительного подпорного узла. Он состоит из струйного насоса, сопла, которое подключено к нагнетательной полости водяного насоса, а диффузор соединен с его всасывающим патрубком и так называемый компенсационной линией (она соединяет расширительный бачок с приемной ка-

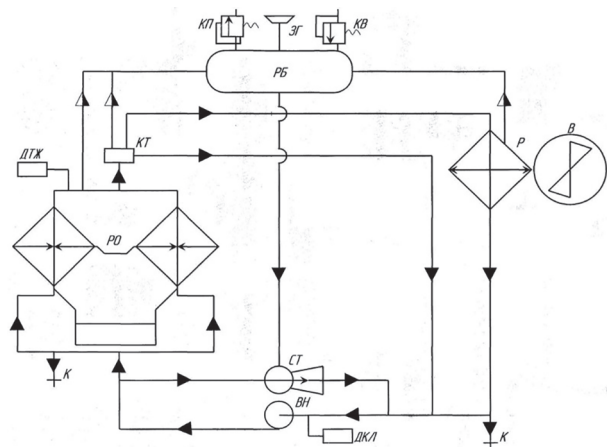


мерой струйного насоса). Предложенная схема позволяет получить значительный подпор при меньшей доле перепускаемой жидкости из полости нагнетания.

Принципиальная схема системы охлаждения с применением струйного насоса представлена на рис. 3. Потoki рабочей и инжектируемой сред поступают в камеру смешивания, где происходит выравнивание скоростей, сопровождающееся повышением давления. Из смесительной камеры поток поступает в диффузор, где происходит дальнейший рост давления. Давление смешанного потока на выходе из диффузора выше давления инжектируемого потока, поступающего в приемную камеру [3].

В данном случае инжектируемым является поток, поступающий из расширительного бачка, рабочим – из нагнетающей полости водяного насоса.

Повышение давления инжектируемого потока без непосредственной затраты механической энергии является основным принципом струйных насосов. Благодаря этому качеству использование струйного насоса позволяет получить более высокое давление на входе в циркуляционный насос по сравнению с давлением столба жидкости в расширительном бачке.



**Рис. 3. Принципиальная схема системы охлаждения:**  
ВН – водяной насос; В – вентилятор; ДКЛ – датчик контрольной лампы; ДТЖ – датчик температуры охлаждающей жидкости; ЗГ – заливная горловина; К – кран сливной; АВ – воздушный клапан; КП – паровой клапан; КТ – коробка термостатов; Р – радиатор; РБ – расширительный бачок; РО – рубашка охлаждения

Основным достоинством струйных насосов является простота схемы включения, простота конструкции, несложность изготовления.

Включение в водяной тракт системы высокотемпературного охлаждения смесительно-подпорного устройства параллельно водяному насосу – один из наиболее простых и эффективных способов увеличения располагаемого кавитационного запаса циркуляционного насоса.

На основе анализа существующих конструкций дизельных двигателей в статье теоретически обоснованы конструктивные решения при проектировании дизельного двигателя с высокотемпературным охлаждением.

Дизельный двигатель с высокотемпературной системой охлаждения может надежно работать в высокогорных районах и в районах с жарким климатом без заметного изменения нормального температурного режима и потери стабильности работы.

Высокотемпературное охлаждение привело к снижению массы и габаритов радиаторов системы охлаждения и к экономии дорогостоящих цветных металлов.

### Заключение

На основании выше изложенного следует, что перевод существующих конструкций на высокотемпературное охлаждение является перспективным направлением в двигателестроении и дает двигателю массу преимуществ перед силовыми установками с обычным охлаждением.

### Литература

1. Васильев Л.С. Автомобильные эксплуатационные материалы. М.: Транспорт, 1986. 198 с.
2. Белов П.М. Двигатели армейских машин. Часть вторая. Конструкция и расчет. М.: Воениздат, 1972. 568 с.
3. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. М.: Энергия, 1989. 352 с.
4. Бурячко В.Р. Силовые установки и системы электрооборудования армейской автомобильной техники. Л.: ВОЛАТТ, 1980. 439 с.
5. Петриченко Р.М. Системы жидкостного охлаждения быстроходных двигателей внутреннего сгорания. Л.: Машиностроение, 1975. 224 с.

### References

1. Vasil'ev L.S. *Avtomobil'nye ekspluatatsionnye materialy* [Automotive operational materials]. Moscow: Transport Publ., 1986. 198 p.
2. Belov P.M. *Dvigateli armeyskikh mashin. Chast' vtoraya. Konstruktsiya i raschet* [Engines of army vehicles. Part two. Construction and calculation.]. Moscow: Voenizdat Publ., 1972. 568 p.

3. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. *Struynye apparaty* [Jet apparatus]. Moscow: Energiya Publ., 1989. 352 p.
4. Buryachko V.R. *Silovye ustanovki i sistemy elektrooborudovaniya armeyskoy avtomobil'noy tekhniki* [Power plants and electrical equipment systems of army vehicles]. Leningrad: VOLATT Publ., 1980. 439 p.
5. Petrichenko R.M. *Sistemy zhidkostnogo okhlazhdeniya bystrokhodnykh dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Liquid cooling systems for high-speed internal combustion engines]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1975. 224 p.

## MODERNIZATION OF THE COOLING SYSTEM FOR DIESEL ENGINES OF THE YAMZ FAMILY WITH THE AIM OF REDUCING CAVITATION DAMAGES

Ph.D. **R.V. Strel'tsov**, Ph.D. **V.G. Vasil'ev**, **A.K. Arabyan**, **A.I. Mamoshin**  
Perm military institute of the troops of the national guard of Russia, Perm, Russia  
Strel'tsov86@rambler.ru

*The article deals with issues related to the modernization of diesel engines to reduce their cavitation damages. During the operation of diesel engines, local fractures can occur, as a rule, the causes of these disruptions can be the vibrations of the walls of cooling cavities of diesel engines, resulting in ruptures of the liquid, which leads to higher pressures, temperatures and potential differences in the cooling sphere. These factors have a destructive effect on the surface of parts, washed with coolant. To maintain a normal thermal regime, it is necessary to remove excess heat from heated parts, that is why the cooling system is designed. One of the promising trends in the development of this system is the increase in the average temperature of the cooling liquid in the water path of internal combustion engines above 100 °C with a corresponding increase in pressure in the jacket space, which eliminates the boiling of water. As the temperature of the coolant rises, the fraction of heat carried away with the cooler decreases, and the period of self-ignition delay decreases, and the degree of increase in pressure during combustion decreases, which has a positive effect on the operation period of engine parts. Analyzing the reliability of the liquid circuit, it must be taken into account that the efficiency of the pump depends largely on the temperature of the coolant. At a coolant temperature close to the boiling point of the coolant, cavitation phenomena occur, which are manifested in a sharp drop in the productivity of the pump due to the appearance of air and steam bubbles in the liquid. It becomes difficult to ensure the non-cavitation operation of the water pump. Cavitation in the flowing part of the pump often leads to a violation of the circulation of coolant in the circuit and overheating of the diesel. The inclusion of a high-temperature cooling system in the water system of the mixing and supporting device parallel to the water pump is one of the simplest and most effective ways to increase the pump's available cavitation supply.*

**Keywords:** internal combustion engine, cooling system, modernization, cavitation failure, high-temperature cooling, pump.