

УДК 621.43

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК С ДВС

А.В. Разуваев, Н.А. Устинов, Н.В. Краснолудский, В.И. Бурлаков

Работа посвящена актуальным в настоящее время вопросам повышения единичной мощности энергетических установок с двигателями внутреннего сгорания, с одной стороны, а с другой – необходимостью обеспечения надежности и работоспособности этой энергетической установки. 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 6ЧН21/21 при $P_{me} = 1,61$ МПа и различной температуре охлаждающей жидкости на выходе из него.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания; энергетическая установка; высокотемпературное охлаждение; критерии работоспособности; втулка цилиндра.

ИЧКИ КҮЙҮҮЧҮ КҮЙМЫЛДАТКЫЧЫ БАР ЭЛЕКТР СТАНЦИЯЛАРЫНЫН ЖОГОРКУ ТЕМПЕРАТУРАДАГЫ МУЗДАТУУНУ КОЛДОНУУ МҮМКҮНЧҮЛҮГҮНӨ ТАЛДОО ЖҮРГҮЗҮҮ

А.В. Разуваев, Н.А. Устинов, Н.В. Краснолудский, В.И. Бурлаков

Бул эмгек бир жагынан ичинен күйүүчү кыймылдаткычтары бар электр станцияларынын агрегаттарынын кубаттуулугун жогорулатуунун учурдагы актуалдуу маселелерине, экинчи жагынан бул электр станциясынын ишенимдүүлүгүн жана натыйжалуулугун камсыз кылуунун зарылдыгына арналган. Муздатылган суюктуктун беттик кайноо учурундагы анын мажбурланган кыймылын эсепке алуу менен жылуулук алмашуу өзгөчөлүктөрүн изилдөөнүн натыйжалары келтирилген. Ичтен күйүүчү кыймылдаткычтын жооптуу бөлүгүнүн – цилиндринин иштөө жөндөмдүүлүгүн аныктоонун критерийлери сунушталган. $P_{me} = 1,61$ МПа жана муздатуучу суюктуктун ар кандай температураларында 6СнН21/ 21 дизелдик кыймылдаткычынын цилиндринин иштөө критерийлеринин чоңдуктары берилген.

Түйүндүү сөздөр: ички күйүүчү кыймылдаткыч; электр станциясы; жогорку температурада муздатуу; иш жөндөмдүүлүк критерийлери; цилиндр жеңи.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING HIGH-TEMPERATURE COOLING POWER PLANTS WITH THE DVS

A. V. Razuvaev, N. A. Ustinov, N. V. Krasnoludsky, V. I. Burlakov

The work is devoted to the current issues of increasing the unit capacity of power plants with internal combustion engines, and on the other hand the need to ensure the reliability and efficiency of this power plant. The analysis of the analytical study of the features of heat exchange at the surface boiling of the underheated liquid taking into account its forced movement is presented, the criteria for determining the health of the responsible part of the DVS - the sleeve of the cylinder - are considered and proposed. The table shows the performance criteria for the 6CHN21/21 diesel cylinder sleeve at $P_{me} = 1.61$ MPa and the different temperature of the coolant on the way out.

Keywords: internal combustion engine; power plant; high-temperature cooling; performance criteria; cylinder sleeve.

В настоящее время все большее применение получают энергетические установки с ДВС, которые по ряду параметров имеют преимущества их применения на объектах различного назначения.

В силу целого ряда причин в качестве таких источников чаще всего выступают дизель-генераторные установки.

Обязательными условиями, которым должны удовлетворять дизели для этих установок, являются: их большая мощность при малой массе и габаритах, высокая надежность и низкий расход топлива. Это диктуется тем, что в отдаленных районах трудно осуществлять регулярный подвоз топлива и запасных частей для текущего ремонта дизель-генераторов.

Получение большой мощности при малых габаритах дизелей возможно при их форсировке по среднему эффективному давлению за счет применения газотурбинного наддува.

Форсирование дизеля по мощности сопровождается увеличением абсолютного количества теплоты, отводимой в систему охлаждения дизеля, что требует увеличения эффективности теплорассеивающих устройств системы охлаждения и приводит к удорожанию и росту габаритов.

Увеличение габаритных размеров радиаторов, повышение их эффективности за счет использования оребренных трубок, увеличение расхода воздуха через радиатор за счет повышения производительности вентиляторов – все это ведет к увеличению габаритов, массы самого дизель-генератора, увеличению расхода топлива, что противоречит требованиям, предъявляемым к дизель-электрическим станциям (ДЭС).

Повысить теплорассеивающую способность радиаторов, не затрагивая их конструкцию, габариты и массу можно, повысив теплоперепад между теплоносителем, циркулирующим в радиаторе и окружающим воздухом за счет применения высокотемпературного охлаждения (ВТО) дизелей. Это охлаждение предусматривает температуру охлаждающей жидкости на выходе из дизеля более 373К (100 °С) [1].

Форсирование дизелей сопровождается ростом теплонапряженности различных их узлов и деталей, что проявляется и в повышении уровня температур и температурных напряжений в деталях цилиндрико-поршневой группы дизеля.

Применение ВТО, в свою очередь, способствует дальнейшему увеличению уровня температуры теплонапряженных деталей, что дополнительно снижает надежность и работоспособность в целом всей дизель-энергетической установки (ДЭС) [2].

Целью данной работы является анализ влияния условий работы ДЭС при высокотемпературном охлаждении и уровне работоспособности высокофорсированного дизель-генератора на основе совершенствования условий охлаждения втулки, так как ее температурное состояние в значительной степени определяет условия работы всей цилиндрико-поршневой группы (ЦПГ) дизеля и надежности ДЭС.

В процессе исследования были определены следующие задачи:

1. Выбор и обоснование критериев работоспособности втулки цилиндра при ВТО.
2. Анализ особенностей теплообмена при поверхностном кипении недогретой жидкости с учетом её вынужденного движения.

Наиболее полный комплекс критериев для оценки изменения работоспособности деталей дизеля при повышении температуры охлаждающей воды предложен А.К. Костиным:

$$q_n = b \cdot C_m^{0.5} \cdot (D / (\eta_v \cdot P_s))^{0.38} \cdot (P_e \cdot q_e \cdot \frac{T_s}{T_0})^{0.88}. \quad (1)$$

Также известны критерии теплонапряженности, которые позволяют судить о теплонапряженности дизеля и его узлов, к ним относятся:

➤ Критерий Гинцбурга:

$$N = \frac{k \cdot P_e \cdot C_m \cdot D}{m}. \quad (2)$$

➤ Критерий Мерланда:

$$k = P_e \cdot S \cdot D \cdot \delta . \quad (3)$$

➤ Критерий фирмы «MAN»:

$$Q = k \cdot P_e^{0.5} . \quad (4)$$

➤ Критерий фирмы «Докофорд»:

$$q = \frac{\left(\frac{B_4}{F_n}\right)^a}{\frac{E}{E-1} \cdot n \cdot S \cdot \Sigma \cdot y \cdot s} , \quad (5)$$

где P_e – среднее эффективное давление; C_m – скорость поршня; D – диаметр поршня; S – ход поршня; n и m – частота вращения и тактность двигателя; k – коэффициент пропорциональности; B_4 и q_e – часовой и удельный расход топлива; F_n – площадь поршня; E – степень сжатия; η_v – коэффициент наполнения; P_s и T_s – давление и температура воздуха во впускных органах, $T_0 = 273^0$ К; a и b – коэффициенты.

Расчетная оценка работоспособности дизеля по данным критериям возможна только по результатам экспериментального определения ряда параметров, входящих в состав критериев. В этих критериях отсутствует такой параметр, как температура охлаждающей воды, поэтому анализ изменения численных значений критериев работоспособности при повышении температуры охлаждающей воды невозможен.

Критерии можно использовать для аналитического исследования, если известна зависимость температур $T_{a,1}$, $T_{k,1}$ от температуры охлаждающей воды.

Таким образом, работоспособность втулки цилиндра достаточно полно будет оцениваться комплексом следующих критериев:

Запас прочности по температурным напряжениям:

$$N_1 = \frac{\sigma_{dl}}{\sigma_t} . \quad (6)$$

Критерий механического износа цилиндровой втулки:

$$N_2 = \frac{T_{кр}}{T_{a1}} . \quad (7)$$

Критерий химической коррозии:

$$N_3 = \frac{T_{a1}}{T_{p-H_2O}} . \quad (8)$$

Критерий термической стойкости масла:

$$N_2 = \frac{T_{лак}}{T_{a1}} . \quad (9)$$

Критерий относительной плотности теплового потока:

$$N_5 = \frac{[q_{кр1}]}{q_{дейст}}. \quad (10)$$

Дополнительно предлагается ввести следующие критерии работоспособности втулки цилиндра.

Критерий равномерности температуры втулки, который представляет собой величину неравномерности температуры напряжений. Чем больше неравномерность температуры, тем больше температурные перепады и температурные напряжения:

$$N_6 = \frac{v_n}{v_0}. \quad (11)$$

Критерий устойчивости работы системы охлаждения дизеля:

$$N_T = \frac{t_s}{t_{cool}}. \quad (12)$$

При достижении температуры воды t_{cool} состояния насыщения t_s , возможно нарушение циркуляции воды из-за образования паровых пробок.

Так как обязательными частями втулки цилиндра и её полости охлаждения являются резиновые элементы, обладающие низкими механическими и температурными свойствами, их работоспособность предлагается оценивать следующими критериями.

Критерий запаса прочности резиновых уплотнений:

$$N_8 = \frac{[P]}{P_{cool}}. \quad (13)$$

В этих критериях: v_i ; v_0 – средняя по поверхности (высоте и периметру) температура втулки со стороны нагревания (охлаждения); $q_{кр1}$ – первая критическая плотность теплового потока; t_s – температура насыщения воды при давлении в системе P_{cool} ; $[t]$ – температура, допускаемая резиной из условия сохранения длительной эластичности; $t_{рез}$ – температура резинового изделия; $[P]$ – максимальное давление, выдерживаемое резиновым элементом.

Для проведения анализа параметров по представленным критериям, были проведены расчеты критериев работоспособности втулки цилиндра дизеля 6ЧН21/21 при $P_{ме} = 1,61$ МПа и различной температуре охлаждающей жидкости на выходе из дизеля (таблица 1).

Уменьшение численного значения критерия показывает на уменьшение работоспособности втулки цилиндра. Предельным случаем для данных критериев следует считать значение, равное 1. Значение критерия менее 1, указывает на потерю работоспособности. Исключение составляет критерий равномерности температуры втулки цилиндра. Уменьшение численности значения этого критерия указывает на выравнивание температур по поверхности и объему втулки, уменьшение температурных напряжений и повышение работоспособности втулки цилиндра. В предельном случае при равенстве критерия единице, втулка цилиндра имеет одинаковую температуру по всему объему. В этом случае во втулке отсутствуют тепловые потоки и температурные напряжения. Теплонапряженность втулки цилиндра в этом случае, с точки зрения термических напряжений, минимальна. Значений меньше единицы этот критерий иметь не может, так как температура охлаждаемой поверхности меньше температуры поверхности со стороны камеры сгорания.

Таблица 1 – Результаты расчетов

Критерий работоспособности	Температура воды за дизелем			
	75°С	85°С	105°С	115°С
Критерий механического износа втулки цилиндра	1,09	1,04	0,98	0,92
Критерий коррозионного износа	0,9	0,95	1,01	1,07
Критерий термической стойкости масла	1,29	1,23	1,15	1,09
Условный коэффициент запаса прочности	11	12	14	14,6
Отношение критической плотности теплового потока к действующей	8,6	8,8	9	9,2
Критерий равномерности температуры втулки цилиндра	1,22	1,18	1,14	1,12
Критерий устойчивости работы системы охлаждения	1,6	1,4	1,24	1,04
Критерий работоспособности резиновых уплотнений под давлением	2	2	1,5	1,2

Из данных таблицы 1 видно, что по таким критериям, как условный коэффициент запаса прочности и отношение плотности теплового потока к критической, втулка цилиндра имеет значительный запас работоспособности, то есть действующие величины термических напряжений и плотности теплового потока на порядок меньше допустимых, несмотря на высокую форсировку дизеля.

Анализ показал, что при повышении температуры воды работоспособность втулки цилиндра, с точки зрения температурных напряжений, плотности теплового потока, сернокислотной коррозии возрастает. С точки зрения механического износа из-за разрыва масляной пленки работоспособность втулки снижается.

Из-за неравномерности численных значений критериев по периметру даже в пределах одного пояса, работоспособность будет определяться разными факторами. Так, например, оказалось, что для втулки цилиндра дизеля 6ЧН21/21, работоспособность ее верхней части со стороны впуска воздуха будет определяться механическим износом зеркала, а со стороны выпуска отработавших газов – коррозионным износом.

В целом, при переходе работы ДЭС на режим ВТО, работоспособность возросла. Однако определенными конструктивными решениями следует уменьшить температуру зеркала цилиндра в верхней части со стороны впуска воздуха до значений, какие она имеет со стороны выпуска отработавших газов или применять масло с более высокими физическими и механическими свойствами.

Исследование теплового состояния втулки цилиндра дизеля 6ЧН21/21 показало, что применение ВТО приводит к увеличению температурного уровня. Ее работоспособность возрастает благодаря уменьшению теплового потока через ее поверхность, и уменьшению температурных напряжений. Повышение ее температурного уровня в целом по всей поверхности приводит к уменьшению механического износа, что обусловлено улучшением работы поршня и поршневых колец, благодаря снижению вязкости масла.

Предельное значение критерия работоспособности равно единице. Меньше единицы означает, что работоспособность отсутствует, т. е. она работает, но какова продолжительность надежной работы неизвестна. Необходимо проводить ресурсные испытания. Чем больше значение критерия работоспособности, тем больше гарантия, что надежность работы обеспечена.

Таким образом, знание числовых значений критерия показывает, какие из показателей работы дизеля (а это входящие в критерий) являются критическими с точки зрения надежности работы. Именно на эти показатели и необходимо обратить внимание в первую очередь для обеспечения надежной работы. Сами по себе эти критерии не позволяют рассчитать моторресурс двигателя.

Комплекс критериев наглядно продемонстрировал, что у втулки цилиндра есть факторы, снижающие ее надежную работу при том, что в целом (в среднем), по всей втулке цилиндра нет опасений по ее работоспособности.

Предложенный авторами комплекс критериев работоспособности втулки цилиндра дизеля позволяет оперативно выяснить, что именно будет ограничивать надежную работу втулки цилиндра, а значит и всего дизеля. Критическое значение критерия работоспособности указывает, что именно надо улучшать в конструкции втулки цилиндра и в условиях ее работы.

Данный комплекс может быть использован для определения работоспособности и других деталей дизеля в качестве исходного, но уточнением, какие из рассмотренных критериев могут быть несущественными для той или иной детали дизеля.

Литература

1. *Агафонов А.Н.* Совершенствование характеристик энергетических установок на базе двигателей ЧН 21/21 объектов малой энергетики / А.Н. Агафонов, А.В. Разуваев. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2006. 148 с.
2. *Разуваев А.В.* Повышение надежности узлов и деталей ДВС, входящих в состав мини-ТЭЦ / А.В. Разуваев, Д.А. Костин, И.О. Кудашева, Т.И. Перельгина // Вестник КРСУ. 2017. Т. 17. № 8. С. 60–63.