

УДК 621.436

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ПЛУНЖЕРНЫХ ПАР ТОПЛИВНОГО НАСОСА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ПО ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ ПЛОТНОСТИ

Хохлов А.А., доктор технических наук, доцент,

тел. 89997693210, khokhlov.73@mail.ru

Хохлов А.Л., доктор технических наук, профессор,

тел. 89278280897, chochlov.73@mail.ru

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

Ключевые слова: гидравлическая плотность, плунжерная пара, зазор, диагностика, эксцентриситет, утечка топлива, прецизионная пара, износ

В статье представлена методика и теоретическое обоснование определения гидравлической плотности плунжерных пар топливных насосов высокого давления. Исследование проводилось на стандартном приспособлении КИ-975, принцип работы которого основан на измерении времени падения рычага под давлением, что характеризует величину утечки рабочей жидкости через прецизионный зазор. В работе подробно рассмотрена геометрия эксцентрично расположенного кольцевого зазора в сопряжении "плунжер-штулка" и выведена аналитическая зависимость для расчета величины этого зазора на основе данных о секундном расходе топлива, его вязкости и создаваемом давлении. Предложенная модель позволяет количественно оценить техническое состояние плунжерных пар.

Введение. Плунжерные пары являются ключевым элементом топливных насосов высокого давления (ТНВД), от состояния которых напрямую зависят мощностные, экономические и экологические показатели дизельного двигателя. Основным эксплуатационным параметром, характеризующим износ [1,2] и герметичность этого сопряжения, является гидравлическая плотность. Ее снижение приводит к падению давления впрыска, неравномерной подаче топлива по цилиндрам и, как следствие, к ухудшению работы двигателя в целом.

Стандартные методы оценки состояния плунжерных пар часто носят косвенный характер [3].

Целью данной статьи является описание и теоретическое обоснование методики определения гидравлической плотности с использованием приспособления КИ-975 (рис.1), позволяющей установить прямую количественную связь между временем измерения и величиной рабочего зазора с учетом его реальной геометрии и физических свойств топлива [4].



Рисунок 1 – Приспособление КИ-759 для испытания плунжерных пар на гидравлическую плотность

Материалы и методы исследований. Определение гидравлической плотности плунжерных пар осуществлялось на приспособлении КИ-975 согласно стандартной методике, в качестве рабочей жидкости использовалась смесь дизельного топлива с индустриальным маслом вязкостью 9 сСт.

Измерение гидравлической плотности плунжерной пары основано на измерении утечек топлива через зазор прецизионной пары при постоянном давлении. Оценивается время до падения рычага приспособления. При испытании плунжерных пар на гидроплотность поверхности, образующие зазор (внутренняя поверхность втулки и наружная поверхность плунжера), расположены с эксцентриситетом e и, следовательно, величина зазора переменна и зависит от угла β (рисунок 2) [5,6].

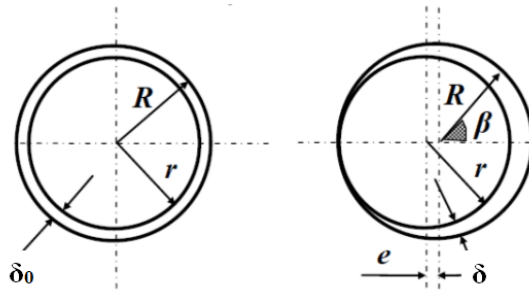


Рисунок 2 – Расположение поверхностей раздела образующих кольцевой зазор в сопряжении «плунжер - втулка»

Если обозначить относительный эксцентриситет $\varepsilon = e/\delta_0$ и учесть, что величина зазора будет описываться выражением $\delta_0 = R - r$, то ширина зазора будет описываться выражением

$$\delta = R + e \cdot \cos \beta - r = \delta_0 (1 + \varepsilon \cdot \cos \beta), \text{ мм}, \quad (1)$$

где R – внутренний радиус втулки плунжера, мм; r – радиус плунжера мм; e – эксцентриситет мм; β – угол между линией смещения эксцентриситета и линией измерения зазора; δ_0 – ширина кольцевого зазора (мм) между плунжером и втулкой при $e=0$; ε – относительный эксцентриситет

Рассматривая кольцевой зазор, как плоскую щель шириной δ (если радиус r представить большим катетом прямоугольного треугольника), элементарный расход топлива через зазор:

$$dQ = \frac{P \cdot \delta^3}{12\eta l} r d\beta = \frac{P \cdot \delta_0^3}{12\eta l} (1 + \varepsilon \cdot \cos \beta)^3 r d\beta, \text{ мм}^3/\text{с}, \quad (2)$$

где P – давление топлива в надплунжерной части, Па; η – коэффициент динамической вязкости; l – длина кольцевого зазора, мм; r – радиус плунжера.

В результате интегрирования по окружности получим секундный расход топлива в зазоре «плунжер-втулка»:

$$Q = \frac{P \cdot \delta_0^3}{12 \cdot \eta \cdot l} \cdot r \int_0^{2\pi} (1 + \varepsilon \cdot \cos \beta)^3 \cdot d\beta = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot P \cdot \delta_0^3}{12 \eta l} \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right), \text{ мм}^3/\text{с.} \quad (3)$$

Из формулы (3) выразим кольцевой зазор

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{12 \cdot Q \cdot \eta \cdot l}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot P \cdot \left(1 + \frac{3}{2} \varepsilon^2 \right)}} \cdot 10^3, \text{ мм} \quad (4)$$

Секундный расход

$$Q = \frac{h \cdot \pi \cdot r^2}{t}, \text{ мм}^3/\text{с.} \quad (5)$$

Подставим выражение (5) в формулу (4), а также с учетом того, что максимальный относительный эксцентриситет $\varepsilon=1$, то величина кольцевого зазора будет равна

$$\delta_0 = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot \eta \cdot l \cdot h \cdot r}{P}} \cdot 10^3, \text{ мм,} \quad (6)$$

где h – ход плунжера, м; t – время до падения рычага приспособления КИ-975.

Экспериментальная часть. Для оценки влияния вязкости рабочей жидкости на результаты измерений были проведены испытания плунжерной пары с использованием смесей дизельного топлива (ДТ) и индустриального масла (РыжМ) различного процентного состава. Вязкость смесей варьировалась в диапазоне от 4,9 до 20,8 сСт. Время падения рычага фиксировалось при трехкратной повторяемости для каждой смеси. Полученные результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения времени падения рычага приспособления КИ-975 в зависимости от вязкости рабочей жидкости

№	% соотношение (ДТ/РыжМ)	Кинематическая вязкость, сСт	Время падения рычага, с		
			Повторяемость эксперимента		
			1	2	3
1	100% ДТ (базовое значение)	9,9-10,9	8,05	7,02	7,36
2	90% ДТ-10% РыжМ	4,9	3,35	3,65	3,22
3	80% ДТ-20% РыжМ	6,5	4,60	4,33	4,59
4	70% ДТ-30% РыжМ	8,8	5,93	5,45	5,06
5	60% ДТ-40% РыжМ	10,7	9,32	9,49	9,58
6	50% ДТ-50% РыжМ	13,0	10,9	11,13	11,22
7	40% ДТ-60% РыжМ	16,5	12,35	13,05	13,0
8	30% ДТ-70% РыжМ	19,1	15,25	14,96	15,69
9	20% ДТ-80% РыжМ	20,8	16,37	16,09	15,7

Анализ экспериментальных данных, представленных в таблице 1, позволяет выявить следующие закономерности с учетом физико-химических свойств компонентов рабочей жидкости. В качестве эталонной принята смесь вязкостью 9,9–10,9 сСт, при исследовании чистого дизельного топлива, время падения рычага для которой составило в среднем 7,48 с. При добавлении в ДТ 10% рыжикового масла наблюдается снижение времени падения рычага до 3,41 с, что не может быть объяснено только изменением вязкости. Данный эффект обусловлен наличием в рыжиковом масле высших жирных кислот (олеиновой, линолевой и стеариновой), содержание которых достигает около 40%. Эти кислоты относятся к поверхностно-активным веществам (ПАВ) и при концентрации рыжикового масла до 50% обеспечивают присутствие до 20% ПАВ в смеси. В результате на поверхностях трения прецизионной пары формируется демпфирующий слой органических ПАВ, снижающий коэффициент трения и, вероятно, изменяющий гидродинамический режим течения в зазоре, что приводит к временному снижению утечек. Начиная с состава 70% ДТ – 30% РыжМ, прослеживается четкая монотонная зависимость времени падения рычага от вязкости: увеличение доли масла способствует росту времени с 5,48 с до 16,05 с для состава 10% ДТ – 80% РыжМ, что связано как с повышением вязкости, так и с дальнейшим наращиванием адсорбционного слоя ПАВ. Коэффициент вариации результатов не

превышает 5–7%, что подтверждает приемлемую повторяемость измерений при стабилизации температуры и состава смеси.

Заключение. Проведенные исследования позволяют заключить, что методика определения гидравлической плотности на приспособлении КИ-975 является эффективным инструментом диагностики плунжерных пар ТНВД. Разработанная математическая модель, учитывающая эксцентриситет плунжера и физические свойства топлива, обеспечивает переход от качественной оценки к количественному расчету величины кольцевого зазора по формуле (6), устанавливающей прямую связь между измеряемым временем падения рычага и степенью износа сопряжения. Экспериментально подтверждено, что наличие в рыжиковом масле высших жирных кислот, обладающих свойствами ПАВ, способствует формированию демпфирующего слоя на поверхностях трения, что приводит к снижению утечек и увеличению времени падения рычага. Реализация предложенного подхода способствует повышению точности диагностики топливной аппаратуры и оптимизации процессов ее технического обслуживания.

Библиографический список:

1. Определение износа плунжерных пар весовым методом / А. А. Хохлов, А. Л. Хохлов, К. А. Балашов, Н. С. Осипов // Сельский механизатор. – 2021. – № 6. – С. 32-33. – EDN FRXJBI.
2. Влияние смесового рыжико-минерального топлива на износ плунжерных пар ТНВД / А. П. Уханов, Д. А. Уханов, А. Л. Хохлов, А. А. Хохлов // Сельский механизатор. – 2020. – № 8. – С. 30-32. – EDN MXMHGI.
3. Хохлов, А. А. Способы, повышающие работоспособность плунжерных пар ТНВД / А. А. Хохлов, М. А. Хабаров // Профессиональное обучение: теория и практика : Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной актуальным вопросам профессионального образования в современных условиях, Ульяновск, 07 октября 2025 года. – Ульяновск: Ульяновский государственный педагогический университет им. И.Н. Ульянова, 2025. – С. 589-594. – EDN RQLTSV.

4. Хохлов, А. А. Определение кинематической вязкости и плотности дизельного смесового топлива / А. А. Хохлов, А. Л. Хохлов, А. А. Цыбин // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 4(72). – С. 229-234. – DOI 10.18286/1816-4501-2025-4-229-234. – EDN WQFNJK.

5. Уханов, А. П. Рыжиковое масло – эффективная биодобавка к нефтяному дизельному топливу / А. П. Уханов, А. А. Хохлов. – Пенза : Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный аграрный университет», 2026. – 261 с. – ISBN 978-5-00196-414-8. – EDN NQPPTY.

6. Уханов, А. П. Биотопливо из рыжика / А. П. Уханов, А. А. Хохлов. – Пенза : Пензенский государственный аграрный университет, 2020. – 192 с. – ISBN 978-5-907181-39-7. – EDN QSNFGL.

ASSESSMENT OF THE CONDITION OF PLUNGER PAIRS OF A HIGH-PRESSURE FUEL PUMP BY HYDRAULIC DENSITY

Khokhlov A.A., Khokhlov A.L.
FSBEI HE Ulyanovsk SAU

Keywords: *hydraulic tightness, plunger pair, clearance, diagnostics, eccentricity, fuel leakage, precision pair, wear*

This article presents a methodology and theoretical basis for determining the hydraulic tightness of high-pressure fuel pump plunger assemblies. The study was conducted using a standard KI-975 fixture, whose operating principle is based on measuring the time it takes for a lever to fall under pressure, which characterizes the amount of hydraulic fluid leakage through a precision clearance. The paper examines in detail the geometry of an eccentrically located annular gap in the plunger-bushing interface and derives an analytical relationship for calculating this gap size based on data on fuel consumption per second, its viscosity, and the generated pressure. The proposed model enables a quantitative assessment of the technical condition of plunger assemblies.