

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ГАЗА В СМАЗОЧНОМ МАТЕРИАЛЕ ТРАНСМИССИЙ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ТРАКТОРОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## DETERMINATION OF GAS CONCENTRATION IN THE LUBRICANT OF TRANSMISSIONS OF ENERGY-SATURATED AGRICULTURAL TRACTORS

**С.Н. ШУХАНОВ**, д.т.н.

Иркутский государственный аграрный университет  
имени А.А. Ежовского, Иркутская область,  
п. Молодежный, Россия, Shuhanov56@mail.ru

**S.N. SHUKHANOV**, DSc in Engineering

Irkutsk State Agrarian University named after A.A. Ezhevsky,  
Irkutsk region, Molodezhnyy, Russia, Shuhanov56@mail.ru

Обеспечение безотказной работы трансмиссии при эксплуатации энергонасыщенных тракторов – важная задача. Надежность ее функционирования во многом зависит от наличия в смазочной системе газа. Целью исследования является разработка методики определения количественного содержания газа в газомасляной смеси. В трансмиссиях тракторов состав газомасляной смеси может иметь различные значения, которые определяются, в основном, геометрическими размерами элементов сборочных единиц, скоростным режимом работы, температурой и сортом смазочного материала. Установить влияние указанных параметров можно путем регистрации состава газомасляной смеси при проведении испытаний как сборочных единиц, так и трансмиссий в целом, при установке на стенде или на тракторы. Выбор метода регистрации состава газомасляной смеси проводился исходя из анализа ряда работ, в которых приводятся различные способы анализа состава двухфазных смесей. Предъявляя требование универсальности метода, заключающейся в единой методике его применения, как в стендовых, так и в объектовых условиях, наибольший интерес представляет метод, связанный с отстоем проб. Предложены наиболее удачные точки в системе смазки трансмиссии, из которых наиболее удобно отбирать пробы, а также характеризующиеся наибольшим содержанием газа в масле. Также предложен наиболее простой и информативный метод для определения объемного содержания газа в смеси. Выведены расчетные зависимости, позволяющие учесть изменение объемного соотношения масло – газ за время отбора пробы. Разработанная методика позволяет сделать оценку необходимой производительности откачивающих насосов принудительных систем смазки. Методика может использоваться как при стендовых, так и при ходовых испытаниях.

**Ключевые слова:** энергонасыщенные тракторы, трансмиссия, смазочный материал, газомасляная смесь, испытания.

Ensuring the trouble-free operation of the transmission during the operation of energy-saturated tractors is an important task. The reliability of its operation largely depends on the presence of gas in the lubrication system. The aim of the study is to develop a methodology for determining the quantitative content of gas in a gas-oil mixture. In the tractor transmissions, the composition of the gas-oil mixture can have different values, which are determined mainly by the geometric dimensions of the elements of the assembly units, the speed mode of operation, the temperature and the grade of the lubricant. The influence of these parameters can be determined by recording the composition of the gas-oil mixture during tests, both assembly units and transmissions in general, when mounted on a test bench or on a tractor. The choice of the method for recording the composition of a gas-oil mixture was carried out on the basis of an analysis of a number of studies in which various techniques for analyzing the composition of two-phase mixtures are given. Demonstrating the requirement of universality of the method, consisting in a uniform method of its application, both in bench and in object conditions, the most interesting is the method associated with sample sludge. The most successful points of the transmission lubrication system are suggested, from which it is most convenient to take samples, as well as those characterized by the largest content of gas in the oil. Also the most simple and informative method for determining the volumetric gas content in the mixture is proposed. Calculated dependences are derived, allowing to take into account the change in the volumetric ratio of oil to gas during the sampling time. The developed method allows to make an assessment of the required capacity of bilge pumps of forced lubrication systems. The technique can be used both for bench and for road tests.

**Keywords:** energy-saturated tractor, transmission, lubricant, gas-oil mixture, tests.

## Введение

Трансмиссия в автотракторной технике работает в тяжелых эксплуатационных режимах. А в случае функционирования в энергонасыщенных тракторах – еще более напряженное. Для обеспечения безотказной работы необходимо исследовать условия ее эксплуатации, в частности наличие газа в системе смазки. Поэтому данный вопрос носит актуальный характер.

## Цель исследования

Целью исследования является разработка методики определения количественного содержания газа в газомасляной смеси.

## Материалы, методы и результаты исследования

Определение состава газомасляной смеси, под которым подразумевается удельное молярное соотношение газовой и масляной фаз, необходимо в первую очередь как для проведения расчетов систем смазки по методике, предложенной в ряде работ [1, 2], так и для оценки необходимой производительности откачивающих насосов принудительных систем смазки. В трансмиссиях тракторов и сельскохозяйственных машин состав газомасляной смеси может иметь различные значения, которые определяются, в основном, геометрическими размерами элементов сборочных единиц, скоростным режимом работы, температурой и сортом смазочного материала. Установить влияние указанных параметров можно путем регистрации состава газомасляной смеси при проведении испытаний как сборочных единиц, так и трансмиссий в целом, при установке на стенде или на тракторы или сельскохозяйственные машины.

Выбор метода регистрации состава газомасляной смеси проводился исходя из анализа ряда работ [3, 4], в которых приводятся различные способы анализа состава двухфазных смесей. В результате анализа установлено 5 основных методов измерения, краткие сведения о которых приведены в табл. 1. Предъявляя требование универсальности метода, заключающейся в единой методике его применения, как в стендовых, так и в объектовых условиях, наибольший интерес представляет метод, связанный с отстоем проб, который приведен в табл. 1 под номером 5.

Проведя выбор метода регистрации состава смеси, следует определить точку системы смазки, в которой будет проводиться регистрация. Точки для отбора проб должны быть легко доступны, а взятые из них пробы масла нести наибольшую информацию по поставленным вопросам. С этих позиций наибольший интерес представляют картеры сборочных единиц трансмиссий или области перед откачивающим насосом принудительных систем смазки. Отбор проб в любой другой точке связан со сложностью, требующей доработки конструкций, которые могут исказить картину протекающих процессов.

Благодаря наличию в картере паровоздушного клапана, давление в нем будет практически равно атмосферному, в результате чего объемное содержание газов и пузырьков в смеси будет иметь наибольшее значение [5, 6]; к тому же малое значение давления облегчит проведение отбора пробы. Наличие сливных отверстий у большинства картеров сборочных единиц не вызывает каких-либо трудностей при отборе проб как в стендовых, так и в объектовых условиях. Основные процессы насыщения газом

Таблица 1

Краткие характеристики методов измерения газосодержания в смазочных материалах

Метод измерения	Достоинства	Недостатки
1. Изотопный плотномер	Точность, непрерывность измерения, автоматическая регистрация данных	Сложное оборудование, выполнение требований к радиационной безопасности
2. Ультразвуковой плотномер	Непрерывность измерения, автоматическая регистрация	Низкая точность, сложное оборудование
3. Гидростатический плотномер	Точность, простота оборудования	Необходимость поддерживать постоянный состав пробы в течение определенного времени
4. Сжатие пробы	Точность, простота измерения	Необходимость наличия специального оборудования для отбора проб
5. Отстой пробы	Точность, простота, доступность	Длительность регистрации

смазочного материала, как следует из анализа работы систем смазки, происходят именно в картерах сборочных единиц. В силу этого за точку отбора проб необходимо и достаточно взять поддон картера сборочной единицы.

Физическое представление процесса определения газосодержания заключается в следующем.

Насыщенное газовыми пузырьками масло вливается в мерный сосуд. После заполнения сосуда регистрируется полученный объем газомасляной смеси. Затем происходит процесс отстоя, в течение которого газовые пузырьки под действием выталкивающей силы стремятся подняться на поверхность жидкости. На поверхности пузырьки лопаются, и находящейся в них газ попадает в окружающую среду. Если в процессе отстоя имело место снижения температуры пробы, то возможно частичное растворение газа в смазочном материале. В конце процесса отстоя (полное исчезновение газовых пузырьков в смазочном материале) проводится следующая регистрация объема. Соотношение объемов пробы до и после отстоя укажет относительное объемное содержание в смазочном материале газовых пузырьков.

Следует отметить, что произвести мгновенный отбор пробы, как правило, невозможно. Значит, за время, в течение которого проводился отбор, часть газовых пузырьков успеет выделиться из смеси, и, следовательно, состав ее в пробе не будет соответствовать составу, который находится в трансмиссии. В таких случаях необходимо проводить запись изменения объема пробы во времени в процессе ее отстоя с целью последующей экстраполяции процесса до момента начала отбора пробы. Запись изменения объема аппроксимировалась зависимостью:

$$\delta = \frac{V_r}{V_{cm}} = f(\tau), \quad (1)$$

где  $V_r$  – объем газа;  $V_{cm}$  – объем газомасляной смеси.

Плотность смеси в каждый момент времени определяется соотношением:

$$\rho_{cm} = \rho_m (1 - \delta),$$

где  $\rho_{cm}$  – плотность смеси;  $\rho_m$  – плотность масла.

По результатам экспериментов аппроксимация бралась в виде:

$$\delta = \frac{A}{\tau + a} + B, \quad (2)$$

где  $\tau$  – время в секундах;  $A, B, a$  – коэффициенты аппроксимации.

Для определения коэффициентов аппроксимации  $A, B, a$  достаточно трех экспериментальных точек  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , снятых во время  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$ . Обозначив  $\delta_1 - \delta_2 = \delta_{12}$ ;  $\delta_1 - \delta_3 = \delta_{13}$ , получим выражения для определения коэффициентов  $A, B, a$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{\left( \frac{\delta_{12}}{\delta_{13}} \right) \tau_2 - \frac{\tau_2 - \tau_1}{\tau_3 - \tau_1} \tau_3}{(\tau_2 - \tau_1) / (\tau_3 - \tau_1) - \delta_{12} / \delta_{13}}; \\ A = \frac{\delta_{12} (\tau_1 + a) (\tau_2 + a)}{\tau_2 - \tau_1}; \\ B = \delta_1 - \frac{A}{\tau_1 + a}. \end{array} \right.$$

Более строго для анализа пробы можно воспользоваться и уравнением переноса газа маслом [3–6]. В это уравнения для пробы смеси  $div CV_M = 0$ ;  $Y_V = 0$ . Считая  $div \bar{j} \ll div CV_r$  (молекулярный перенос газовых пузырьков происходит значительно менее интенсивно, чем перенос, обусловленный выталкивающими силами), получим уравнение концентрации газовых пузырьков для пробы газомасляной смеси:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -div C \bar{V}_r = -\frac{\partial}{\partial x} (CV_{Vx}).$$

Пренебрегая изменением скорости газа по высоте пробы, окончательно принимаем:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = -V_r \frac{\partial c}{\partial x}.$$

Краевые условия задаются в виде:

$$X = 0; C = 0; \tau = 0; C = C_0.$$

Для решения уравнения применяется преобразование Лапласа по переменной  $X$ :

$$\frac{d\bar{c}}{d\tau} + V_r S \bar{c} = 0; \quad \bar{c}(0, S) = C_0 / S.$$

Решение уравнения запишется в виде:

$$\bar{c}(\tau, S) = C_0 / S_{exp} \left( -S \int_0^\tau V_r d\tau \right).$$

Учитывая, что:

$$e^{-as} / S \div \mathcal{V}(t-a), \text{ где } \mathcal{V}(t-a) = \begin{cases} 1 \text{ при } t > a \\ 0 \text{ при } t \leq a \end{cases},$$

получим:

$$c(\tau, x) = C_0 \mathcal{V} \left( x - \int_0^\tau V_r d\tau \right). \quad (3)$$

Величина  $\delta(\tau)$  из (1) с использованием (3) выразится:

$$\delta(\tau) = \left( \frac{V_{CM_0}}{F \int_0^\tau \mathcal{V}_r d\tau} - 1 \right)^{-1},$$

где  $V_{CM_0}$  – объем смеси в начальный момент времени;  $F$  – площадь мерного сосуда. Величина  $\mathcal{V}_r$  определяется экспериментально по изменению уровня газомасляной смеси в сосуде. По экспериментальной зависимости  $\mathcal{V}_r(\tau)$  численно определяется  $\int_0^\tau \mathcal{V}_r d\tau$ .

Проведенные расчеты показали удовлетворительное совпадение оценок плотности газомасляной смеси, полученных обоими методами. При этом, наименее трудоемка первая аппроксимация по формуле (2), что определило ее предпочтительное использование.

### Заключение

Разработанная методика дает возможность определять концентрацию газа в смазочном материале, использующемся в трансмиссиях тракторов и сельскохозяйственных машин. Значение концентрации газа необходимо для реализации разработанной методики расчета систем смазки; одновременно дает и возможность оценить необходимую производительность откачивающих насосов сборочных единиц трансмиссий. Методика может быть использована при стендовых и ходовых испытаниях как отдельных сборочных единиц, так и трансмиссий в целом.

### Литература

1. Маломыжев О.Л., Федотова Н.Е., Скutel'ник В.В. Метод расчета подач масла к деталям агрегатов сельскохозяйственных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2016. № 12. С. 19–22.
2. Маломыжев О.Л., Семенов А.Г., Скutel'ник В.В. Разработка методики расчета системы смазки деталей машин // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. № 4 (32). С. 98–104.
3. Башкиров В.С., Капитонов О.К. Методика определения содержания нерастворенного газа в рабочей жидкости // Гидропривод и системы управления (строительных, тяговых и дорожных машин): межвузовский сборник. Новосибирск, 1976. С. 94–102.
4. Васильев А.М. Прибор для определения количества воздуха в перекачиваемой жидкости (фазометр). М.: Машгиз. 1952. № 11. С. 70–73.
5. Маломыжев О.Л., Скutel'ник В.В., Бектемиров А.С., Баранов А.В. Определение растворимости газа в маслах // Расчет, диагностика и повышение надежности элементов машин: межвузовский сборник научных трудов. Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2011. С. 21–29.
6. Бектемиров А.С., Маломыжев О.Л., Скutel'ник В.В. Исследование параметров растворимости газа в маслах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2010. № 5 (45). С. 125–128.

### References

1. Malomyzhev O.L., Fedotova N.E., Skutel'nik V.V. Method for calculating oil deliveries to parts of aggregates of agricultural machines. *Traktory i sel'khoz mashiny*. 2016. No 12, pp. 19–22 (in Russ.).
2. Malomyzhev O.L., Semenov A.G., Skutel'nik V.V. Development of a technique for calculating the lubrication system of machine parts. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013. No 4 (32), pp. 98–104 (in Russ.).
3. Bashkirov V.S., Kapitonov O.K. Method for determining the content of undissolved gas in a working fluid. *Gidroprivod i sistemy upravleniya (stroitel'nykh, tyagovykh i dorozhnykh mashin): mezhvuzovskiy sbornik [Hydraulic drive and control systems (construction, traction and road machines): interuniversity collection]*. Novosibirsk, 1976, pp. 94–102 (in Russ.).
4. Vasil'ev A.M. *Pribor dlya opredeleniya kolichestva vozdukh v perekachivaemoy zhidkosti (fazometr) [The device for determining the amount of air in the pumped liquid (phase meter)]*. Moscow: Mashgiz. 1952. No 11, pp. 70–73 (in Russ.).
5. Malomyzhev O.L., Skutel'nik V.V., Bektemirov A.S., Baranov A.V. Determination of gas solubility in oils. *Raschet, diagnostika i povyshenie nadezhnosti elementov mashin: mezhvuzovskiy sbornik nauchnykh trudov. Altayskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet im. I.I. Polzunova [Calculation, diagnostics and increase of reliability of machine elements: interuniversity collection of scientific papers. Altai State Technical University named after I.I. Polzunov]*. Barnaul, 2011, pp. 21–29 (in Russ.).
6. Bektemirov A.S., Malomyzhev O.L., Skutel'nik V.V. Investigation of the solubility parameters of gas in oils. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Irkutsk State Technical University]*. 2010. No 5 (45), pp. 125–128 (in Russ.).