

З.Я. ЛУРЬЕ, д-р техн. наук, профессор, НТУ «ХПИ»;
И.М. ФЕДОРЕНКО, науч. сотрудник, НТУ «ХПИ»

ПОВЫШЕНИЕ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИ МЕХАТРОННОГО ГИДРОАГРЕГАТА ПУТЕМ УЧЕТА ДВУХФАЗНОСТИ РАБОЧЕЙ ЖИДКОСТИ

В статті з позиції фізичних особливостей двофазної робочої рідини і літературного огляду визнаних публікацій запропоновані аналітичні залежності щільності і в'язкості її в функції газомісткості, температури та тиску. Збудовані графіки і дана оцінка відхилень щільності і в'язкості від їх значень при нормальних умовах

В статье из позиции физических особенностей двухфазной рабочей жидкости и литературного обзора признанных публикаций предложены аналитические зависимости плотности и вязкости ее в функции газосодержания, температуры и давления. Построены графики и дана оценка отклонений плотности и вязкости от их значений при нормальных условиях

In this article from the standpoint of physical characteristics of the two-phase working fluid and review of the literature-known publications proposed analytical dependence of the density and viscosity as a function of its gas content, temperature and pressure. Diagrams and an estimate of the density and viscosity deviations from their values under normal conditions

Введение

Известно [1 – 4], что в рабочей жидкости (РЖ) объемных гидроагрегатов (ГА) технологических машин при их работе всегда имеется воздух в двух фазах (в растворенном виде – фаза Р и в нерастворенном виде – фаза Г). Понижение давления приводит к переходу фазы Р в фазу Г, а повышение давления – к обратному процессу. В порядке первого приближения эти процессы во времени можно принять экспоненциальными.

Наличие фазы Г увеличивает сжимаемость РЖ, уменьшает модуль упругости и плотность, повышает вязкость [5 – 7], замедляет обработку управляющих воздействий, способствует колебательности, увеличивает время разгона и выхода на установившийся режим рабочего органа машины, т.е. ухудшает показатели качества переходных процессов. Исследованию упругих свойств двухфазной РЖ и их влиянию на динамику гидросистем посвящен ряд работ [2, 3, 5 – 8]. В этих работах основное внимание уделено теоретическим и экспериментальным исследованиям по определению зависимости модуля объемной упругости двухфазной РЖ. Здесь в первую очередь следует отметить выражения

$$E_c = k(p + 10^5)(Ap + B) \frac{(1 - m_0)D_1 + m_0D_2}{k(p + 10^5)(1 - m_0)D_1 + m_0(Ap + B)D_2}, \quad (1)$$

$$\text{где } D_1 = \sqrt[A]{\frac{Ap_0 + B}{Ap + B}}, \quad D_2 = \sqrt[k]{\frac{p_0 + 10^5}{p + 10^5}} \quad [5]$$

$$\text{или } E_C = \frac{1 + \frac{m_0}{1 - m_0} D_2 \cdot \sqrt[A]{\frac{Ap + B}{AP_0 + B}}}{1 + \frac{m_0}{1 - m_0} \frac{Ap + B}{k(p + 10^5)} D_2 \cdot \sqrt[A]{\frac{Ap + B}{Ap_0 + B}}} E_{од} \quad [7, 9]; \quad (2)$$

где A , B – параметры РЖ, зависящие от типа масла и рабочей температуры гидросистемы; m_0 – содержание нерастворенного воздуха в относительных единицах; k – показатель политропы; $E_{од}$ – модуль упругости однофазной РЖ; P_0 – начальное давление двухфазной РЖ; p – давление в гидросистеме.

Остальные аналитические зависимости, по мнению авторов работ [3, 6, 8, 10] являются приближенными, степень точности которых в технической литературе не оценена. Наряду с этим не уделено должное внимание вопросу переменности плотности и вязкости двухфазной РЖ в функции газосодержания, температуры и давления. Одновременный учет влияния среды Γ на модуль E_C и на переменность плотности ρ_C , вязкости μ_C , ν_C и, следовательно, на рабочий процесс ГА в настоящее время отсутствует в технической литературе. При исследовании динамики различных ГА чаще всего модуль E_C , плотность ρ_C , вязкость μ_C и ν_C принимают постоянными, равными средним значениям.

Современная тенденция в направлении разработки мехатронных ГА (МГА) [11], в составе которых предусматривается информационная подсистема, позволит учесть особенности характеристик двухфазной РЖ для улучшения их функционирования. Кроме того, введение в модель уточненных зависимостей РЖ повысит ее адекватность натурному образцу и откроет возможность на стадии проектирования ставить и решать оптимизационные задачи по улучшению рабочего процесса.

Настоящая статья посвящена определению аналитических зависимостей плотности и вязкости двухфазной РЖ в функции газосодержания, температуры и давления.

1 Анализ литературных источников

В работе [12] с позиции акустических свойств рассматривается жидкость с газовыми пузырьками, т.е. с фазой Γ . Присутствие пузырьков сильно изменяет условия распространения звуковых волн, в частности, уменьшает скорость звука. Автор отмечает, что длина звуковой волны велика по

сравнению с радиусами пузырьков и средним расстоянием между ними и поэтому справедливо так называемое гомогенное приближение: жидкость с пузырьками газа можно рассматривать в среднем как однофазную среду с некоторым эффективным значением плотности. Так средняя плотность среды равна

$$\rho_C = \rho_{ж}(1 - z) + \rho_{г}z, \quad (3)$$

где $\rho_{ж}$, $\rho_{г}$ – плотности жидкости и газа соответственно; z – доля объема среды, занятой пузырьками (при принятом в настоящей статье обозначении $z = m_0$).

Плотность РЖ зависит от температуры. С ростом температуры плотность уменьшается. Указанная зависимость характеризуется температурным коэффициентом α объемного расширения РЖ и плотность в работе [3] предлагается определять по уравнению

$$\rho_{ж} = \frac{\rho_0}{1 + \alpha(T - T_0)}, \quad (4)$$

где ρ_0 – плотность при температуре T_0 и давлении P_0 (т.е. при начальных условиях).

В работе [6] на примере расхода сжимаемой РЖ в нагнетательной полости цилиндра при допущении, что трение и нерастворенный воздух отсутствует и волновые процессы не возникают, рассматривается выражение

$$\frac{dm}{dt} = \rho \frac{dV}{dt} + V \frac{d\rho}{dt},$$

где m – массовый расход, V – объем РЖ.

Учитывается условие неразрывности потока

$$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{\rho}$$

и линеаризованный закон деформации РЖ

$$\frac{dV}{V} = - \frac{d\rho}{E_{ж}}.$$

При этом получено

$$d\rho = \frac{\rho_0}{E_{ж}} d\rho.$$

При интегрировании предыдущего выражения

$$\rho - \rho_0 = \frac{\rho_0}{E_{ж}} (p - p_0)$$

или

$$\rho = \rho_0 \left(1 + \frac{(p - p_0)}{E_{ж}} \right). \quad (5)$$

Подобное уравнение для движения сжимаемой РЖ массой m в гидросистеме имеется в работе [3].

Остановимся на вопросе, связанным с плотностью газовой составляющей двухфазной РЖ в части влияния температуры и давления. Формула Клайперона

$$pV = \frac{m}{m_{\mu}} RT_K \quad [13] \quad (6)$$

является уравнением состояния газа (воздуха) и справедлива для идеального газа. Для реальных газов выражение (6) – приближенно. Здесь R – газовая постоянная; m_{μ} – масса моля; T_K – температура по шкале Кельвина, равная $273^0 + T$.

Из формулы (6) непосредственно определяется плотность газа

$$\rho_{г} = \frac{m}{V} = \frac{pm_{\mu}}{RT_K}, \quad (7)$$

возрастающая с увеличением давления p и уменьшающаяся по гиперболической зависимости с ростом температуры T_K .

Анализ известных нам литературных источников позволил установить, что в настоящее время отсутствуют аналитические зависимости для определения плотности и вязкости двухфазной РЖ в функции значений газосодержания, температуры и давления, которые совместно с уравнением модуля объемной упругости позволят повысить точность определения рабочего процесса объемных ГА.

2 Постановка задачи

В процессе эксплуатации объемных ГА ряда технологического оборудования, в том числе системы жидкой смазки узлов трения металлургического оборудования, периодически изменяются режимы работы, приводящие к нежелательному повышению и пульсациям давления и температуры РЖ, которые при нерегулируемых насосах снижаются в допустимом интервале с помощью установки переливного клапана. При этом, в большинстве случаев, параметры РЖ – модуль упругости, плотность и вязкость принимаются без учета газосодержания, температуры и давления постоянными, равными средним значениям. Если уравнений модуля упругости E_C двухфазной РЖ для практических расчетов имеется несколько, то для определения плотности и вязкости их практически нет.

Поиск аналитических зависимостей плотности и вязкости двухфазной РЖ, построение графиков, позволяющих оценить отклонение значений плотности и вязкости от их значений при нормальных условиях и составляют постановку задачи.

3 Решение

Уравнение (3) четко разграничивает определение значений плотности жидкости и газа только в функции газосодержания. Влияние температуры на плотность жидкости с учетом газосодержания в двухфазной РЖ можно учесть на основании формулы (4) выражением

$$\rho_{ж_0}(1-m_0) \left[\frac{1}{1+\alpha(T-T_0)} \right].$$

Аналогично можно учесть влияние давления на основе выражения (5)

$$\rho_{ж_0}(1-m_0) \left[\frac{1}{1+\alpha(T-T_0)} \right] \left(1 + \frac{P-P_0}{E_C} \right), \quad (8)$$

где вместо модуля упругости однофазной РЖ введем модуль E_C двухфазной.

Выражение (8) полностью учитывает изменение плотности жидкой составляющей двухфазной РЖ относительно начального значения $\rho_{ж_0}$.

Перейдем к газовой составляющей. На основе формулы (7) с учетом объема газа в смеси, изменения давления от p_0 до p и температуры от T_{K0} до T_K плотность газовой составляющей определяется выражением

$$\rho_{Г_0} m_0 \frac{T_{K0}}{T_K} \frac{P}{p_0}, \quad (9)$$

где $\rho_{Г_0}$ – начальное значение.

Следовательно, в целом

$$\rho_C = \rho_{ж_0}(1-m_0) \left[\frac{1}{1+\alpha(T-T_0)} \right] \left(1 + \frac{P-P_0}{E_C} \right) + \rho_{Г_0} m_0 \frac{T_{K0}}{T_K} \frac{P}{p_0}. \quad (10)$$

С учетом работ [4, 6, 7] коэффициенты динамической μ_C и кинематической ν_C вязкости для двухфазной РЖ определяются уравнениями

$$\mu_C = \mu_0(1+1,5m_0) \left(1 + a_1 \frac{P-P_0}{p_0} \right) e^{-\lambda(T-T_0)}, \quad (11)$$

$$\nu_C = \mu_C / \rho_C, \quad (12)$$

где μ_0 – начальное значение; a_1 и λ – коэффициенты, равные соответственно 0,003 и 0,028 1/град.

На рис. 1 показаны четыре зависимости плотности ρ_C (на рис. 1 обозначена r_{OC}) в функции m_0 от 0 до 0,15, рассчитанные по уравнению (10) при постоянном давлении $p = 0,5 \text{ МПа}$ (значение в системах смазки металлургического оборудования), $\alpha = 7 \cdot 10^{-4} / \text{град}$ и дискретных значениях 20, 30, 40 и 50°C температуры T для двухфазной РЖ. Каждая зависимость близка к прямой и характеризуется уменьшением ρ_C с ростом газовой составляющей m_0 при конкретном значении T . Все зависимости эквидистантно смещены вниз с ростом T . При $p = p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $m_0 = 0$, $T = 20^\circ$ и $E_C = 1500 \text{ МПа}$ плотность $\rho = \rho_{ж0} = 890 \text{ кг/м}^3$. При $p = 0,5 \text{ МПа}$, $m_0 = 0,15$ $E_C = 1,2 \text{ МПа}$, $T = 50^\circ \text{C}$ плотность равна 769 кг/м^3 , т.е. снижается от $\rho_{ж0} = 890$ до 769 кг/м^3 , т.е. на 13,6%, а при $p = 10 \text{ МПа}$ – на 15,5%. При $m_0 = 0,05$ и $p = 0,5 \text{ МПа}$ это снижение составит 6,3%.

Кривые коэффициента динамической вязкости μ_N (на рис. 2 обозначен M_j) в функции T , рассчитанные по формуле (11) при постоянном давлении $p = 0,5 \text{ МПа}$, изображены на рис. 2. С ростом температуры коэффициент μ_C уменьшается и, как следует из выражения (11), по закону $e^{-\lambda(T-T_0)}$. Особо отметим, что с ростом значения m_0 от 0 до 0,15 при фиксированном T , коэффициент μ_C растет. При $p = p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $T = T_0 = 20^\circ \text{C}$ и $m_0 = 0$ коэффициент $\mu_C = \mu_0 = 0,027 \text{ Па} \cdot \text{с}$. При $p = 0,5 \text{ МПа}$, $T = 50^\circ \text{C}$ и $m_0 = 0,15$ он равен $0,0144 \text{ Па} \cdot \text{с}$, т.е. уменьшается в 1,88 раза, а при $T = 60^\circ \text{C}$ – в 2,48 раза. Такое сильное влияние температуры на μ_C требует принятия особых мер в гидроагрегатах систем жидкой смазки. Из рис. 2 видно, что если поддерживать перепад температур, например, в интервале (45 – 50°C), то диапазон изменения коэффициента μ_C будет удовлетворять режимам эксплуатации систем жидкой смазки металлургического оборудования. Последнее может быть реализовано с помощью функциональных возможностей мехатронного гидроагрегата [11].

При расчете пользуются кинематическим коэффициентом вязкости ν_C , четыре кривых которого, рассчитанные по формуле (12) при постоянном

давлении $p = 0,5 \text{ МПа}$ в функции температуры T и дискретных значениях m_0 для двухфазной РЖ, показаны на рис. 3. На рис. 3 коэффициент ν_C обозначен N_{ju} в сСт. С ростом T коэффициент ν_N уменьшается.

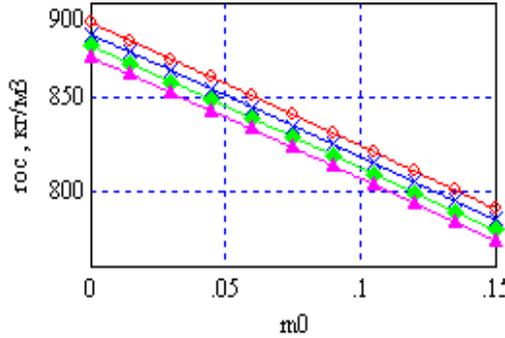


Рисунок 1 – Графики плотности РЖ: \diamond – при $T = 20^{\circ}$; \times – при $T = 30^{\circ}$; \blacklozenge – при $T = 40^{\circ}$; \blacktriangle – при $T = 50^{\circ}$

С ростом значения параметра m_0 растет и ν_C . При $p = p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $T = T_0 = 20^{\circ} \text{ C}$ и $m_0 = 0$ коэффициент $\nu_C = 30,7 \text{ сСт}$. При $p = 0,5 \text{ МПа}$, $T = 50^{\circ} \text{ C}$ и $m_0 = 0,15$ он равен 18,8 сСт, т.е. уменьшается в 1,63 раза, а при $T = 60^{\circ} \text{ C}$ – в 2,15 раза. Уменьшение этого коэффициента меньше, чем коэффициента μ_C .

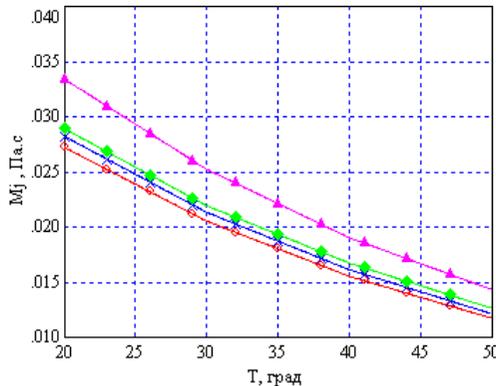


Рисунок 2 – Кривые динамической вязкости РЖ: \diamond – при $m_0 = 0$; \times – при $m_0 = 0,025$; \blacklozenge – при $m_0 = 0,05$; \blacktriangle – при $m_0 = 0,15$

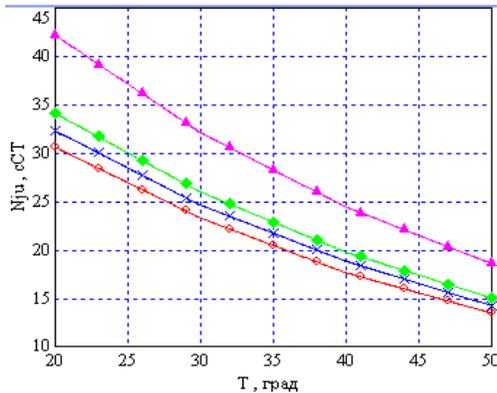


Рисунок 3 – Кривые кинематической вязкости РЖ: \diamond – при $m_0 = 0$; \times – при $m_0 = 0,025$; \blacklozenge – при $m_0 = 0,05$; \blacktriangle – при $m_0 = 0,15$

Последнее объясняется тем, что при вычислении ν_c плотность ρ_c , входящая в знаменатель формулы (12), уменьшается, а следовательно, дробь растет.

Выводы

Предлагаемые уравнения (10) – (12) плотности и вязкости двухфазной рабочей жидкости, составляющие которых проверены на практике, и известное уравнение (1) модуля объемной упругости позволяют повысить адекватность динамической модели, а, следовательно, рабочего процесса мехатронного гидроагрегата системы смазки натурному объекту.

Список литературы: 1. *Чупраков Ю.И.* Гидропривод и средства гидроавтоматики. – М.: Машиностроение, 1974. – 232 с. 2. *Кондаков Г.А., Никитин В.Н.* и др. Машиностроительный гидропривод – М.: Машиностроение, 1978. – 495 с. 3. *Башта Т.М.* Гидропривод и гидропневмоавтоматика.– М.: Машиностроение, 1972. – 320 с. 4. *Абрамов Е.И., Колесниченко К.А.* и др. Элементы гидропривода. – К.: Техника, 1977. – 224 с. 5. *Прокофьев В.Н., Лузанова И.А.* и др. Экспериментальное исследование упругих свойств двухфазных рабочих жидкостей гидроприводов объемного типа // Изв. ВУЗов. Машиностроение, 1968. – ч. 2. – С. 87 – 93. 6. *Гамынин Н.С.* Гидравлический привод систем управления. – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с. 7. *Хохлов В.А., Прокофьев В.Н.* и др. Электрогидравлические следящие системы. – М.: Машиностроение, 1971. – 431 с. 8. *Гийон М.* Исследование и расчет гидравлических систем. Пер. с франц. – М.: Машиностроение, 1964. – 388 с. 9. *Лузанова И.А., Нейман В.Г.* и др. Влияние переменности упругих свойств гидропривода на динамику гидродвигателя // Автоматика и телемеханика, 1969. – № 3. – С. 120 – 135. 10. *Данилов Ю.А., Кирилловский Ю.Л.* и др. Аппаратура объемных гидроприводов. Рабочие процессы и характеристики. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с. 11. Патент на корисну модель № 46325 (Україна) МПК (2009)F15B9/00. Мехатронний гідроагрегат з гібридним керуванням виконавчим механізмом / *Федоренко І.М., Лур'є С.Я.* і др. Опубл. 10.12.2009, Бюл. № 23. 12. *Наугольных К.А., Островский Л.А.* Нелинейные волновые процессы в акустике / Под ред. Гапонова-Грехова. – М.: Наука, 1990. – 287 с. 13. *Фриш С.Э., Тиморева А.В.* Курс общей физики. – М.-Л.: Госиздат техн-теор лит, 1949. – 566 с.

Надійшла до редколегії 06.08.2010