Для получения нового вяжущего НПБВ нами были разработаны и сконструированы пилотные герметические установки двух типов – динамического и статического со специальным выходом для выделяющихся газов (в основном, оксидов серы и углерода). Каждая имеет свои достоинства и недостатки. Технологический контроль за процессом получения НПБВ в таких установках наиболее рационально вести по данным ротаметрической вязкости композиции при высоких температурах.

На дополнительно построенной опытной установке были выпущены несколько партий НПБВ на которых на АБЗ произведены минимальные партии нового асфальтобетона. Они были сразу использованы для создания опытных участков на активно действующей автодороге в 2016 и 2018 годах. Мониторинг этих участков показал, что новый асфальтобетон имеет гораздо выше качество, чем применявшийся на традиционном битуме БНД 90/130.

1. ГОСТ 22245 – 90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия.
2. ГОСТ Р 52056-2003. Вяжущие полимерно-битумные на основе блок-сополимеров типа стиролбутадиен-стирол. Технические условия.
3. US Patent No. 5, 284625. Isaev A., 1994.
4. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Дьячковский Ф.С. и др. Девулканизация резины в ультразвуковом поле // Материаловедение. 2005. № 1. С. 3–9.
5. Хмелев В.Н., Леонов Г.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Ультразвуковые multifunctional и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве / Алтайский гос. техн. ун-т, БТИ. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.
6. Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция [Текст] / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 300 с.
7. Корнейчук Г.К., Буценко Ю.А. Новое высококачественное вяжущее для асфальтобетонных дорожных покрытий с эффективным использованием резины шинных отходов // Вестник Инженерной школы Дальневост. федеральн. ун-та. 2015. № 4. С. 23–28.
8. Корнейчук Г.К., Никифоров П.А., Пигильцин О.С., Буценко Ю.А. Деструкция резины под действием ультразвука // Южно-сибирский научный вестник. 2015. № 3(11). С. 41–51
9. Пат. 2489464 Российская Федерация: Способ приготовления резинобитумной композиции» / Г.К. Корнейчук; заявл. 2012127266 от 29.06.2012, зарег. 10.07.2013.
10. Пат. 2550888 Российская Федерация: Способ приготовления резинобитумной композиции / Г.К. Корнейчук; заявл. 2012154148 от 13.12.2013, зарег. 15.04.2015.

Мукутадзе М.А., Мукутадзе А.М., Василенко В.В., Болгова Е.А.

Клиновидные опоры скольжения, обусловленных расплавом

*Ростовский государственный университет путей сообщения
(Россия, Ростов-на-Дону)*

doi: 10.18411/scienceconf-05-2019-07

idsp: scienceconf-05-2019-07

Аннотация

В работе дается метод формирования точного автомодельного решения задачи гидродинамического расчета клиновидной опоры скольжения (ползун, направляющая), работающей на микрополярном жидком смазочном материале, обусловленной расплавом направляющей, с учетом зависимости вязкостных характеристик микрополярного смазочного материала и проницаемости пористого слоя на поверхности ползуна от давления.

Дана оценка влияния параметров, обусловленного расплавом направляющей, структурно-вязкостных параметров микрополярного жидкого смазочного материала и проницаемости пористого слоя на несущую способность и силу трения.

Ключевые слова: опора скольжения, вязкий несжимаемый жидкий микрополярный смазочный материал, расплавленная поверхность направляющей, проницаемость пористого слоя.

Введение. Одним из методов решения конструктивно-эксплуатационных задач может быть применение смазывания расплавом легкоплавкого покрытия подшипников.

Смазывание жидкими металлами применяют при температурах, при которых обычные смазочные среды претерпевают необратимые физико-химические изменения. Гидродинамическому расчету системы, состоящей из «ползуна – направляющей», при расположении ползуна под углом к поверхности направляющей, в условиях отсутствия смазочного вещества, и учета зависимости вязкости смазочного материала от давления посвящено большое количество работ [1–16]. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, является низкая несущая способность и не учет влияния реологических свойств неньютоновских смазочных материалов. Кроме того, процесс смазывания пластичного смазочного материала не является самоподдерживающимся.

Постановка задачи. Рассматривается клиновидная опора, состоящая из системы «ползун – направляющая». Предполагается, что поверхности ползуна с пористым покрытием и направляющей, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, разделены слоем смазочного материала, обладающими микрополярными свойствами, ползун неподвижен, а направляющая, выполненная из материала с низкой температурой плавления, движется в сторону сужения зазора со скоростью u^* (рис. 1).

Рис. 1. Рабочая схема

В декартовой системе координат $x'oy'$ (рис. 1) уравнение контура ползуна с пористым покрытием и расплавленной поверхности направляющей, покрытой легкоплавким металлическим расплавом, можно записать в виде.

$$y' = h_0 + x' \operatorname{tg} \alpha, \quad y' = -\eta' f'(x'). \quad (1)$$

Предполагаем, что вязкостные характеристики микрополярного жидкого смазочного материала и проницаемости пористого покрытия зависят от давления по показательному закону

$$\mu' = \mu_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad \kappa' = \kappa_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad \gamma' = \gamma_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad k' = k_0 e^{\tilde{\alpha} p'}, \quad (2)$$

где μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; κ', γ' – коэффициенты вязкости микрополярного смазочного материала; μ_0 – характерная вязкость ньютоновского смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое; $\tilde{\alpha}$ – экспериментальная постоянная величина, k_0 – характерная проницаемость пористого слоя; k' – проницаемость пористого слоя.

Рассматривается условие, когда все тепло, выделяющееся в смазочной пленке, идет на плавление поверхности материала направляющей.

Исходные уравнения и граничные условия. В качестве исходных уравнений рассмотрим безразмерную систему уравнений движения смазочного материала,

обладающего микрополярыными свойствами для случая «тонкого слоя», уравнения неразрывности, Дарси, а также формула скорости диссипации механической энергии для определения функции $\Phi(x)$, обусловленную расплавленной поверхностью направляющей

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + N^2 \frac{\partial v}{\partial y} = e^{-ap} \frac{dp}{dx}, \quad \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{v}{N_1} + \frac{1}{N_1} \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0, \quad \frac{d\Phi(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy.$$

$$K = \frac{2\mu_0 u^*}{h_0 L'}$$

где

с соответствующими граничным условиям:

$$v = 0, \quad v = 0, \quad u = 0, \quad \text{при } y = 1 + \eta x = h(x);$$

$$v = 0, \quad v = 0, \quad u = -1 \quad \text{при } y = -\Phi(x);$$

$$p(0) = p(1) = \frac{P_a}{p^*}; \quad \Phi(x) = \tilde{g}_0 = Kg_0 \quad \text{при } x = 0.$$

$$p = P \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad \frac{\partial P}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при } y^* = 1 + \eta x; \quad (4)$$

$$\tilde{M} = \frac{kl}{h_0^3}, \quad \eta = \frac{ltg\alpha}{h_0}$$

где

Размерные величины связаны соответствующими безразмерными величинами следующими соотношениями:

$$u' = u^* u; \quad v' = u^* \varepsilon v; \quad v' = v^* v; \quad p' = p^* p; \quad y' = h_0 y; \quad \mu' = \mu_0 \mu; \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa; \quad \gamma' = \gamma_0 \gamma; \quad N^2 = \frac{\kappa}{2\mu + \kappa};$$

$$N_1 = \frac{2\mu l^2}{\kappa h_0^2}; \quad l^2 = \frac{\gamma}{4\mu}; \quad \varepsilon = \frac{h_0}{L}; \quad v^* = \frac{u^*}{2h_0}; \quad p^* = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) Lu^*}{2h_0^2}; \quad x' = lx. \quad \tilde{\alpha} = \frac{\alpha}{p^*};$$

$$\text{в пористом слое: } x' = lx^*; \quad y' = ly^*; \quad P' = p^* P; \quad \kappa' = \kappa_0 \kappa; \quad (5)$$

Учитывая малость зазора, а также равенство $v = 0$ на подвижных и неподвижных поверхностях, осредним второе уравнение системы (3) по толщине смазочного слоя, получим:

$$\frac{1}{h(x) + \Phi(x)} \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} dy = \frac{1}{N_1} \cdot \frac{1}{h(x) + \Phi(x)} \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} v dy + \frac{1}{N_1} \cdot \frac{1}{h(x) + \Phi(x)} \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \frac{\partial u}{\partial y} dy. \quad (6)$$

Решая уравнения (6) с точностью до членов $O(\Phi/N_1)$, $O(1/N_1^2)$, получим:

$$v = \frac{1}{2N_1 h(x)} (y^2 - h(x)y), \quad \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{2N_1 h(x)} (2y - h(x)), \quad A_1 = \frac{1}{2N_1 h(x)}. \quad (7)$$

С учетом (7) система уравнений (3) в принятом нами приближении имеет вид:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{N^2}{2N_1 h(x)} (2y - h(x)) = e^{-ap} \frac{dp}{dx}, \quad v = \frac{1}{2N_1 h(x)} (y^2 - h(x)y),$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0; \quad \frac{d\Phi(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy. \quad (8)$$

Введем обозначение $z = e^{-ap}$. Продифференцируем обе части равенства, получим:

$\frac{dz}{dx} = -\alpha e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx}$ или $e^{-\alpha p} \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz}{dx}$, тогда уравнения (8) и соответствующие граничные условия примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{N^2}{2N_1 h(x)} (2y - h(x)) &= -\frac{1}{\alpha} \frac{dz}{dx}, \quad v = \frac{1}{2N_1 h(x)} (y^2 - h(x)y), \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} &= 0, \quad \frac{\partial^2 P}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P}{\partial y^{*2}} = 0, \quad z \frac{d\Phi(x)}{dx} = K \int_{-\Phi(x)}^{h(x)} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 dy, \\ v &= 0, \quad v = 0, \quad u = 0 \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x = h(x); \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} v &= 0, \quad u = -1, \quad v = 0 \quad \text{при} \quad y = -\Phi(x); \quad z(0) = z(1) = e^{-\alpha \frac{P_a}{P^*}}, \\ p &= P \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u = \tilde{M} \frac{\partial P}{\partial y^*} \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad \frac{\partial P}{\partial y^*} = 0 \quad \text{при} \quad y^* = 1 + \eta x; \end{aligned} \quad (10)$$

В качестве малого параметра принимая K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, будем искать функцию $\Phi(x)$ в виде:

$$\Phi(x) = -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) - \dots = H, \quad (11)$$

Граничные условия для безразмерных компонентов скорости u и v на контуре $y = 0 - \Phi(x)$ можно записать в виде:

$$\begin{aligned} v(0 - H(x)) &= v(0) - \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} H(x) - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} \frac{H^2(x)}{2} - \dots = 0; \\ u(0 - H(x)) &= u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \Big|_{y=0} H(x) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \Big|_{y=0} \frac{H^2(x)}{2} - \dots = -1. \end{aligned} \quad (12)$$

Асимптотическое решение системы дифференциальных уравнений (9) с учетом граничных условий (10) и (12) будем искать в виде рядов по степеням малого параметра K :

$$\begin{aligned} v &= v_0(x, y) + Kv_1(x, y) + K^2v_2(x, y) + \dots, \\ u &= u_0(x, y) + Ku_1(x, y) + K^2u_2(x, y) + \dots, \\ \Phi(x) &= -K\Phi_1(x) - K^2\Phi_2(x) - K^3\Phi_3(x) - \dots, \\ z &= z_0 + Kz_1(x) + K^2z_2(x) + K^3z_3(x) \dots \end{aligned} \quad (13)$$

Выполняя подстановку (13) в систему дифференциальных уравнений (9) с учетом граничных условий (10), получим следующие уравнения:

– для нулевого приближения:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u_0}{\partial y^2} + \frac{N^2}{2N_1 h(x)} (2y - h(x)) &= -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_0}{dx}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial x} + \frac{\partial u_0}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial^2 P_0}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_0}{\partial y^{*2}} &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} K\Phi_0(0) &= Kg_0; \quad z_0(0) = z_0(1) = e^{-\alpha \frac{P_a}{P^*}}; \\ v_0 &= 0, \quad v_0 = 0, \quad u_0 = 0, \quad \text{при} \quad y = 1 + \eta x; \\ v_0 &= 0, \quad u_0 = -1, \quad v_0 = 0 \quad \text{при} \quad y = 0; \end{aligned}$$

$$p_0 = P_0 \text{ при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u_0 = \tilde{M} \frac{\partial P_0}{\partial y^*} \text{ при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0};$$

$$\frac{\partial P_0}{\partial y^*} = 0 \text{ при } y^* = 1 + \eta x;$$
(15)

– для первого приближения:

$$\frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} = -\frac{1}{\alpha} \frac{dz_1}{dx}, \quad \frac{\partial v_1}{\partial x} + \frac{\partial u_1}{\partial y} = 0, \quad z_0 \frac{d\Phi_1(x)}{dx} = K \int_{-\Phi_0}^{1+\eta x} \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)^2 dy; \quad \frac{\partial^2 P_1}{\partial x^{*2}} + \frac{\partial P_1}{\partial y^{*2}} = 0$$
(16)

с граничными условиями:

$$v_1 = \left(\frac{\partial v_0}{\partial y} \right)_{y=0} \cdot \Phi_1(x); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial y} \right)_{y=0} \cdot \Phi_1(x);$$

$$v_1 = 0, \quad v_1 = 0, \quad u_1 = 0 \quad \text{при } y = 1 + \eta x;$$

$$z_1(0) = z_1(1) = 0, \quad K\Phi_1(0) = K\alpha^*, \quad \Phi(0) = \Phi(1) = \alpha^*.$$

$$p_1 = P_1 \text{ при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0}; \quad u_1 = \tilde{M} \frac{\partial P_1}{\partial y^*} \text{ при } y^* = 1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0};$$

$$\frac{\partial P_1}{\partial y^*} = 0 \text{ при } y^* = 1 + \eta x;$$
(17)

Точное автомодельное решение. Точное автомодельное решение задачи для нулевого приближения в принятом нами приближении с точностью до членов $O(\eta/N_1)$ будем искать в виде:

$$u_0(x, y) = \frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial x} + U_0(x, y); \quad v_0(x, y) = -\frac{\partial \Psi_0(x, y)}{\partial y} + V_0(x, y); \quad \Psi_0(x, y) = \tilde{\Psi}_0(\xi); \quad \xi = \frac{y}{h(x)};$$

$$V_0(x, y) = -\tilde{v}(\xi) \cdot h'(x); \quad U_0(x, y) = \tilde{u}_0(\xi); \quad \tilde{u}_0'(\xi) + \xi \tilde{v}_0'(\xi) = 0.$$
(18)

Подставляя (18) в систему дифференциальных уравнений (14) с учетом граничных условий (15), получим

$$\tilde{\Psi}_0'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{C}_1 = 6,$$

$$\tilde{u}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \frac{N^2}{2N_1} \left(\frac{\xi^3}{3} - \frac{\xi^2}{2} \right) - \left(\frac{N^2}{12N_1} + \frac{\tilde{C}_1}{2} + 1 \right) \xi + 1.$$

$$\frac{dz_0}{dx} = -\alpha \left(\frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)} \right)$$
(19)

Из граничного условия $z_0(0) = z_0(1) = e^{-\alpha \frac{P_a}{P^*}}$ следует $\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 + \frac{1}{2} \eta \right),$

для функции z_0 получим следующее выражение

$$z_0 = \alpha \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2} (x - x^2) + e^{-\alpha \frac{P_a}{P^*}}$$
(20)

Используя асимптотическое разложение гидродинамического давления с точностью до $O(\eta^2)$, $O\left(\alpha \frac{P_a}{P^*}\right)^3$ имеем:

$$p_0 = \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left[\tilde{C}_1 \frac{\eta}{2} (x^2 - x) \right] + \frac{p_a}{p^*} \quad (21)$$

С учетом (21) решение уравнения Дарси представлено в виде:

$$P_0(x, y^*) = R_0(y^*) + \frac{\eta}{2} \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) (x^2 - x) \tilde{C}_1 + \frac{p_a}{p^*} \quad (22)$$

Подставляя выражение (22) в уравнение Дарси системы (14) для функции $R(y^*)$ получим:

$$R(y^*) = -\tilde{C}_1 \eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(\frac{y^*}{2} + \left(1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) y^* \right) + \frac{p_a}{p^*} \quad (23)$$

Константа $\tilde{C}_1$ находится из уравнения неразрывности интегрируемого в пределах от 0 до 1:

$$\tilde{C}_1 = \frac{6}{-12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1} \quad (24)$$

тогда для гидродинамического давления для нулевого приближения получим следующее выражение:

$$P_0 = \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \frac{3\eta(x^2 - x)}{-12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(2 + \frac{H}{h_0} \right) + 1} + \frac{p_a}{p^*} \quad (25)$$

С учетом (26) для z_0 получим:

$$z_0 = \frac{3\eta(x^2 - x)}{-12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(2 + \frac{H}{h_0} \right) + 1} + e^{-\alpha \frac{p_a}{p^*}} \quad (26)$$

Для определения $\Phi_1(x)$ с учетом уравнения (26), приходим к следующему уравнению:

$$\frac{d\Phi_1(x)}{dx} = \frac{h(x)}{z_0} \int_0^1 \left(\frac{\psi_0''(\xi)}{h^2(x)} + \frac{\tilde{u}'_0(\xi)}{h(x)} \right)^2 d\xi. \quad (27)$$

Интегрируя уравнение (27), с учетом $K\Phi_1(0) = K\alpha^*$, получим:

$K\Phi_1(0) = K\alpha^*$, получим:

$$\Phi_1(x) = \frac{1}{z_0} \left[\frac{\tilde{C}_1^2}{12} \left(-x + \frac{\eta}{2} x^2 \right) + \left(4 + \frac{N^4}{720N_1^2} \right) \left(x - \frac{\eta}{2} x^2 \right) \right] + \alpha^*. \quad (28)$$

Точное решение для первого приближения находим для нулевого приближения, в результате исмеем:

$$\tilde{\psi}'_1(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{u}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} + M \right) \xi + M. \quad (29)$$

где давления в контактной зоне для первого приближения исходя их уравнения

$$\frac{dz_1}{dx} = -\alpha \left(\frac{\tilde{C}_1}{h^2(x)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(x)} \right), \quad z_1 = -\alpha \left(\tilde{C}_1 \left(x - \eta x^2 \right) + \tilde{C}_2 \left(x - \frac{3}{2} \eta x^2 \right) \right) \quad (30)$$

С учетом граничных условий $z_1(0) = z_1(1) = 0$ для $\tilde{C}_2$ получим следующее выражение

$$\tilde{C}_2 = -\tilde{C}_1 \left(1 + \frac{1}{2} \eta \right)$$

Тогда для z_1 получим

$$z_1 = \alpha \tilde{C}_1 \frac{\eta}{2} (x - x^2) \quad (31)$$

Используя асимптотическое разложение для определения p_1 приходим к следующему приближенному уравнению:

$$p_1 = \frac{\eta}{2} \tilde{C}_1 (x - x^2) \quad (32)$$

С учетом (32) решение уравнения Дарси представлено в виде:

$$P_1(x^*, y^*) = R_1(y^*) + \frac{\eta}{2} \tilde{C}_1 (x - x^2). \quad (33)$$

Подставляя выражение (33) в уравнение Дарси системы (16) для функции $R(y^*)$, получим

$$R_1(y^*) = \eta \tilde{C}_1 \left(\frac{y^{*2}}{2} + \left(1 + \eta x + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) y^* \right), \quad (34)$$

Константа $\tilde{C}_1$ находится из уравнения неразрывности интегрируемого в пределах от 0 до 1

$$\tilde{C}_1 = \frac{6M}{12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1} \quad (35)$$

Гидродинамическое давление для первого приближения имеет вид:

$$P_1 = \frac{3M\eta (x - x^2)}{12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1} \quad (36)$$

Определение несущей способности и силы трения

С учетом (14), (16), (25) и (36) для несущей способности и силы трения имеем:

$$W = p^* l \int_0^1 \left(p_0 + K p_l - \frac{p_a}{p^*} \right) dx = \frac{(2\mu_0 + \kappa_0) l^2 u^* \eta}{4h_0^2} \left[\frac{\left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right)}{12\tilde{M}\eta \left(1 + \alpha \frac{p_a}{p^*} - \frac{\alpha^2}{2} \left(\frac{p_a}{p^*} \right)^2 \right) \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) - 1} + \frac{KM}{12\tilde{M}\eta \left(2 + \frac{\tilde{H}}{h_0} \right) + 1} \right]$$

$$L_{mp} = \mu \int_0^1 \left[\frac{\partial u_0}{\partial y} \Big|_{y=0} + K \frac{\partial u_1}{\partial y} \Big|_{y=0} \right] dx = \mu_0 \left(1 - \alpha p + \frac{\alpha^2 p^2}{2} \right) \left[\left(1 - \frac{\eta}{2} \right) (1 + KM) - \frac{N^2}{12N_1} \left(1 + \frac{\eta}{2} \right) \right]. \quad (37)$$

По результатам численного анализа и графиков, приведенных на рисунке 2 – 3 установлено, что значительно повышение несущей способности и уменьшение силы трения происходит при росте структурно-вязкостных параметров микрополярного смазочного материала (N и N_1), параметра K , обусловленного расплавом поверхности легкоплавкого покрытия поверхности направляющей, и параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от давления.

Рисунок 2 - Зависимость несущей способности и силы трения от параметра K , обусловленного расплавом и скоростью диссипации энергии, параметра α , характеризующего толщину пористого покрытия и от параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от давления

1. Кропачев Д.Ю., Гришин А.А., Масло А.Д. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий // Литье и металлургия. 2012. № 3(66). С. 126–127.
2. Перельман В.И. Краткий справочник химика М.-Л. : Химия, 1964.
3. Бирюков В.П., Татаркин Д.Ю., Хриптович Е.В., Фишков А.А. Определение влияния режимов лазерной наплавки и состава порошковых материалов на износостойкость покрытий // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2017. № 1. С. 63–66.
4. Шаповалов В.В. Применение методов физико-математического моделирования и трибоспектральной идентификации для мониторинга фрикционных механических систем / В.В. Шаповалов, А.Л. Озябкин, П.В. Харламов // Трение и смазка в машинах и механизмах – 2009. – № 5, С. 49-57.
5. Щербак П.Н.. Многофазовые смазки РАПС и способы их нанесения / П.Н. Щербак, В.В. Шаповалов // Вестник машиностроения – 2002. – № 4, С. 45-46.
6. Озябкин А.Л. Динамический мониторинг триботермодинамики фрикционных мобильных систем / А.Л. Озябкин // Вестник донского государственного технического университета – 2011. – Т.11. - № 5(56), С. 644-654.
7. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure / V.V. Vasilenko, E.O. Lagunova, M.A. Mukutadze, V.M. Prikhodko // International Journal of Applied Engineering Research. – 2017. – No. 19. – P. 9138 – 9148.
8. Расчетная модель клиновидной опоры скольжения, работающей на смазочном материале с расплавом / К.С. Ахвердиев, М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, Василенко В.В. // Трение и износ. – Гомель : ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси», 2018. – Т. 39, № 1. – С. 62–71.
9. Мукутадзе, М.А. Разработка расчетной модели гидродинамического смазочного материала, образующегося при плавлении подпятника, при наличии принудительной смазки / М.А. Мукутадзе, Е.О. Лагунова, В.В. Василенко // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2018. – № 3, С. 76-83.
10. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports in turbulent friction regime // Advances in Engineering Research (AER), volume 157 International Conference "Actual Issues of Mechanical Engineering" (AIME 2018). P. 346-353.
11. Akhverdiev K.S., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Calculated model of wedge-shaped sliding supports taking into account rheological properties of viscoelastic lubricant // Advances in Engineering Research, volume 158, International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport (AviaENT 2018). P. 246-253.
12. Lagunova E.O., M.A. Mukutadze. Radial Friction Bearings Conditioned by Melt // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering, Lecture Notes in Mechanical Engineering (ICIE 2018). P. 897 – 910.

13. Гармони́на А.Н. Расчетная модель электропроводящей смазки упорного подшипника с демпфирующими свойствами при наличии электромагнитных полей / А.Н. Гармони́на // Вестник РГУПС. – 2015. – № 2 (58) – С. 146-152.
14. Опацких А.Н. Расчетная модель упругодеформируемого упорного подшипника с учетом зависимости электропроводности, вязкости смазочного материала и проницаемости пористого слоя от давления / А.Н. Опацких, С.А. Солоп, С.С. Черняев // Трибология – машиностроению XII Международная научно-техническая конференция, посвященная 80-летию ИМАШ РАН, г. Москва, 2018. – С.375 – 378.
15. Гармони́на А.Н. Гидродинамический расчет радиального подшипника / А.Н. Гармони́на // Сборник материалов международной-научно-практической конференции «Машины, агрегаты и процессы. Проектирование, создание и модернизация», №1. – Санкт-Петербург. – 2018. – С.61-65.
16. Мукутадзе М.А. Расчетная модель радиального подшипника с учетом зависимости электропроводности, проницаемости и вязкости смазочного материала от давления / М.А. Мукутадзе, А.Н. Гармони́на // «Полимерные композиты трибология» Поликомтриб-2017. Тезиса докладов. Международная научно-техническая конференция. Гомель. Беларусь. – 2017. – С. 65.

Налетов В.А.

Анализ подходов к оптимальной организации процесса бинарной ректификации

*Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева
(Россия, Москва)*

doi: 10.18411/scienceconf-05-2019-08

idsp: scienceconf-05-2019-08

В процессе бинарной ректификации исходный поток питания в колонне разделяется на два продукта: низкокипящий – дистиллят и высококипящий – кубовый остаток. Для простоты проведем анализ различных подходов к оптимальной организации двухсекционной колонны в стационарном режиме при разделении двухкомпонентной смеси, принципиальная схема которой представлена на рис. 1.

Рисунок 1 – Принципиальная схема ректификации бинарной смеси

С целью сопоставимости полученных результатов, принятые допущения аналогичны допущениям в работе [1], а именно:

- поток питания – жидкость при температуре кипения;
- дефлегматор (конденсатор) – полный;
- массообмен эквимольный;
- эффекты перемешивания между соседними сечениями пренебрежимо малы;
- поток питания подается при температуре кипения в то сечение колонны, состав жидкости в котором наиболее близок составу питания.