

Рисунок 6. Зависимость коэффициента трения от удельного нагружения контактной пары трения и содержания абразивных частиц в гидросмеси

### ВЫВОДЫ

1. Контактные кольца с износостойким рабочим слоем на основе разнозернистых порошков карбида вольфрама и

УДК 62-762

Голуб В.М., Голуб М.В., Свищев М.А., Холодарь Б.Г.

## ТЕЧЕНИЕ ЖИДКОСТИ ЧЕРЕЗ УЗКИЕ ЩЕЛИ КОНТАКТНЫХ ПАР ТРЕНИЯ ТОРЦОВЫХ УПЛОТНЕНИЙ

Выбор конструктивных параметров торцовых уплотнений валов гидромашин, работающих с высоким давлением перекачиваемой среды, определяется из условия минимального износа контактных колец и минимальной, практически нулевой, утечки уплотняемой среды через торцовую щель. Последнее может иметь место при оптимальном режиме трения контактирующих поверхностей, разделенных тонкой пленкой жидкости.

Различают три основных режима трения: жидкостной, граничный и сухой [2]. При жидкостном режиме трения отмечаются видимые протечки жидкости через щель, а сопротивление течению определяется вязкостью при смещении слоев по толщине разделяющей пленки. Такой режим обеспечивает большую долговечность по износостойкости пары трения, однако, не обеспечивает герметичности сопряжения. Величина утечки зависит от толщины разделительной пленки и перепада давления на контактной щели:

$$q = \frac{2\pi D}{3\mu L} h^3 \Delta p, \quad (1)$$

где

$D$  – средний диаметр контактного кольца;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;  $L$  – ширина пояса (длина щели);  $h$  – половина высоты щелевого зазора;  $\Delta p$  – перепад давления на контактном поясе.

Для снижения утечки следует добиваться предельного уменьшения толщины пленки за счет приложения нагрузки на контактные кольца. Шероховатость и отклонение от плоскостности рабочих поверхностей должны составлять на порядок меньше толщины разделительной пленки. Режим трения при таких условиях оценивается как граничный. Характер-

медной матричной связки способны работать длительное время в сухом режиме трения.

2. Введение никеля в матричную связку износостойкого покрытия, наносимого на рабочие поверхности контактных колец, повышает его абразивную износостойкость.
3. Наличие абразива в рабочей среде, действующей на контакт пары трения, сужает диапазон допустимых нагрузок. Более интенсивному износу в абразивной среде подвергнуты вращающиеся кольца пар трения.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Голуб М.В. Износостойкие композиционные материалы на основе карбида вольфрама, меди и никеля. - Долговечность трущихся деталей машин. – М.: «Машиностроение», 1985, вып. 1. с. 217-234.
2. Поляк М.С. Технология упрочнения. Т.1 – М.: «Машиностроение», 1995. – 832с.
3. Witalis Pyczynski, Michail V. Golub. Konstytuowanie i badanie warstwy wierzchniej uszczelnien pomp wirowych. – Budowa i eksploatacja maszyn, zeszyty naukowe, 6. Bialystok, 1998. – s. 127-133.

ным для него является то, что смазочное действие жидкости и ее течение становятся зависимыми не только от вязкости, но и от ее физико-химических свойств и поверхности контактных взаимодействующих молекул с твердым телом, от ее способности адсорбироваться на трущихся поверхностях, образуя граничные пленки. Такие разделительные адсорбированные пленки подвержены износу, однако в торцовом уплотнении существуют условия их самовосстановления.

Граничный режим характеризуется весьма малыми потерями на трение и практически отсутствием утечки, что является желательным к его поддержанию. При неблагоприятных условиях, с повышенной нагрузкой и температуры на контакте, возможно разрушение разделительной пленки с переходом к сухому режиму трения, когда важную роль начинает играть материал колец пар трения и их способность работать без разрушения некоторое время при дефиците смазки.

В случае, когда контактирующие поверхности разделены жидкостной пленкой, решение задачи об утечке сводится к определению ее величины при ламинарном течении. Однако количественное описание протечки вязкой жидкости через узкие щели представляет определенные трудности. Анализ показывает, что модели, основанные на использовании ньютоновской жидкости и дающие для плоской щели кубическую зависимость расхода  $Q$  от величины зазора щели  $h$ , т.е.  $Q \sim h^3$ , не вполне соответствуют эксперименту. Уточнения достигаются при использовании моделей неньютоновских жидкостей [1-6]. Среди них имеются как модели, использующие зависимость вязкости от давления, температуры, скорости, так и модели комплексного типа, например модель тела Шведова-Бингама, в которой пристеночный слой уже не является собственно жидкостью, а

Голуб Владимир Михайлович. Аспирант каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Голуб Михаил Владимирович. Зав. каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Свищев М.А. Аспирант каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Холодарь Б.Г. Доцент каф. СМиТМ Брестского государственного технического университета.

БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.

обладает свойствами упруго-пластической среды, скорость точек которой в пристеночном слое равна нулю. Среди жидкостей с нелинейными свойствами достаточно общую картину движения среды дает модель тела Прандтля, в которой для связи касательных напряжений и скорости сдвига используется закон "гиперболического синуса" [5].

Математические модели, применяемые для описания течения жидкости в узких щелях микронных размеров, должны отражать влияние наиболее значимых внутренних и внешних факторов. С этой точки зрения представляется целесообразным построить достаточно простую модель, которая могла бы отразить малоподвижность пристеночных слоев и подвижность центральной зоны движущейся в тонкой щели среды за счет введения зависимости вязкости от поперечной координаты щели. Сама щель рассматривается достаточно тонкой, с зазором в несколько микрон. Возможность описания течения среды в таких щелях с позиций механики сплошной среды является доказанной [6,7].

В качестве физического обоснования такой модели для жидкостей органического происхождения, типа продуктов переработки нефти, используем известные представления о том, что возле стенок существуют адгезионные поля достаточно сложной природы [1-4], которые притягивают к стенкам концевые радикалы **COOH** длинноцепочечных молекул, выстраивающихся возле стенок напоподобие щетинок и образующих, вместе с окружающими их частицами жидкости, некоторую коллоидную структуру, у которой размеры мицелл составляют величину, сравнимую с зазором щели. В этом случае, сопротивление движению жидкости в пристеночном слое будет складываться из двух компонент - сдвиговой, пропорциональной поперечному градиенту скорости, и напорной, которая связана с необходимостью обтекания препятствий и зависит от количества цепочек мицелл, перекрывающих часть проходного сечения щели, и их изгибной жесткости, определяющей возможность изменения формы мицелл и их приспособляемость к движущемуся потоку. Эту часть сопротивления можно соотносить не столько с поперечным градиентом скорости, сколько с самой величиной скорости, как это имеет место в задачах об обтекании препятствий. Но поскольку жесткость образующихся у стенок молекулярных цепей конечна и сами они изгибаются в направлении течения жидкости, то внутри этой зоны щели также будет иметься некоторый градиент скорости. В связи с этим в модели первого приближения мы пренебрегаем необходимостью учета зависимости сопротивления от скорости и вводим в рассмотрение нелинейную вязкость среды по формуле (изотермический случай)

$$\eta = \eta_0 \exp(\alpha p + f(y)), -h \leq y \leq h, \quad (2)$$

где  $\eta_0$  — вязкость течения макроскопического потока жидкости при нормальных условиях,  $\exp(\alpha p)$  — отражает учет зависимости вязкости от уровня давления в среде,  $\exp(f(y))$  — учет зависимости вязкости от поперечной координаты частицы внутри щели.

Значения функции  $f(y)$  при  $y = \pm h$  должны определять вязкость течения граничных слоев жидкости, которая по нашим представлениям должна намного превосходить вязкость течения срединных слоев потока. При возрастании зазора щели  $h$  (большие зазоры), относительная роль пристеночных слоев должна падать. Подобная модель позволяет, на наш взгляд, сохранить в силе представление об отсутствии градиента давления по высоте зазора, которое используется во многих работах [4,6,7].

Для функции  $f(y)$  примем выражение вида

$$f(y) = \gamma \left( \exp(-\beta \cdot h^m \cdot (\frac{h-y}{h})^m) + \exp(-\beta \cdot h^m \cdot (\frac{h+y}{h})^m) \right) \quad (3)$$

где

$\gamma, \beta, m$  — некоторые постоянные, подлежащие определению по данным эксперимента. Выражение (3) учитывает возможное взаимовлияние полей каждой из стенок щели. При больших зазорах влияние функции  $f(y)$  в средней зоне щели становится малозначимым, что сохраняет для вязкости значение, определяемое течением жидкости в макропотоках. Из (3) получаем

$$f(0) = \gamma \cdot 2 \exp(-\beta \cdot h^m), f(\pm h) = \gamma \cdot (1 + \exp(-\beta \cdot h^m 2^m))$$

Роль входящих в (3) параметров  $\gamma, \beta, m$  очевидна и не нуждается в пояснениях. Графически влияние параметров  $\beta$  и  $m$  иллюстрируется на рисунке 1.

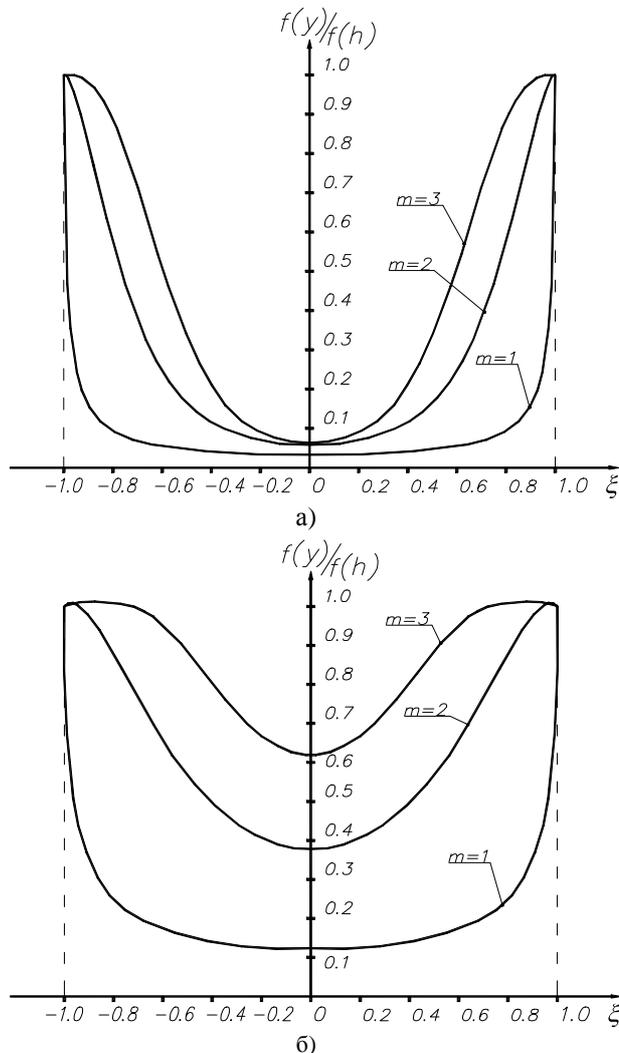


Рисунок 1. Зависимость функции  $f(y)$  от параметров  $\beta$  и  $m$  ( $a - \beta=1.5, б - \beta=0.8$ )

Для удобства дальнейших рассуждений и выводов введем в рассмотрение безразмерную поперечную координату  $\xi$  по формуле  $y = \xi \cdot h$ . В этом случае параметры  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $m$  приобретают роль некоторых структурных параметров, отражающих свойства как протекающей в канале жидкости, так и адгезионные свойства пары "стенка - жидкость". В частности, влияние шероховатости поверхности, величина выступов (неровностей) которой сравнима с размером зазора щели, также интегрально учитывается этими параметрами.

Течение в щели считаем плоским, ламинарным. Учитывая также условие неразрывности течения и условие несжимаемости жидкости, приходим к уравнению движения частиц жидкости в виде

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau}{\partial y} = \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \eta \frac{\partial V}{\partial y} \right) = 0,$$

где  $p(x)$  — давление в точках с координатой  $x$ ,  $\tau(x, y)$  — касательное напряжение в точке с координатами  $x, y$ ,  $V(y)$  — скорость струйки жидкости с поперечной координатой  $y$ .

Используя далее зависимости (2) - (3) приходим к двум уравнениям относительно  $p(x)$  и  $V(y)$ :

$$\frac{1}{\eta_0 \exp(\alpha p)} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} = A;$$

$$\exp(f(y)) \cdot \left( \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial f}{\partial y} \cdot \frac{\partial V}{\partial y} \right) = A,$$

где  $A = const$  — некоторая постоянная.

Решение для  $p(x)$  имеет вид:

$$p = -\frac{1}{\alpha} \cdot \ln(1 + A \cdot \alpha \cdot \eta_0 \cdot (L - x)),$$

где  $L$  — длина щели (по координате  $x$ ). Из условия  $p(0) = p_0$ , где  $p_0$  — давление на входе в щель, находим значение  $A$ :

$$A = -\frac{1 - \exp(-\alpha p_0)}{\eta_0 \alpha L} \approx -\frac{p_0}{\eta_0 L},$$

откуда видно, что влияние параметра  $\alpha$  на распределение давления вдоль щели относительно невелико, поэтому во многих работах перепад давления по щели принимается линейным.

Для  $V(y)$  имеем линейное уравнение, решение

которого с учетом граничных условий  $\frac{\partial V}{\partial y}(0) = 0$ ,

$V(h) = 0$  принимает вид:

$$V(\xi) = V_0 \cdot \left( 1 - \frac{\Phi(\xi)}{\Phi(1)} \right), \quad (4)$$

где  $\Phi(\xi) = \int_0^\xi \xi \exp(-f(\xi)) d\xi$ ,  $V_0$  — скорость

течения жидкости на оси щели (в точках с координатой  $\xi = 0$ ), которую можно определить через секундный массовый расход  $Q$  жидкости через щель. Тогда получим:

$$V(\xi) = \frac{Q \cdot (\Phi(1) - \Phi(\xi))}{2 \cdot \rho \cdot b \cdot h \cdot (\Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) d\xi)}, \quad (5)$$

где  $\rho$  — плотность жидкости,  $b$  — ширина щели (в направлении, ортогональном осям  $x, y$ ).

В связи со сложностью выражения (3), аналитическое решение (4)-(5) не выражается в элементарных функциях и при  $m \neq 0$  или  $m \neq 1$  построить его можно только численно. При  $\alpha = m = 0$ , что соответствует постоянному значению вязкости среды в щели, получаются известные решения для ньютоновской жидкости, приводящие к кубической зависимости расхода через щель  $Q$  от величины зазора  $h$  [7].

В общем случае секундный массовый расход можно найти из выражения

$$Q = \int_h dm = \frac{2 \rho b h^3 \cdot (1 - \exp(-\alpha p_0))}{\eta_0 \alpha L} \times \left( \Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) d\xi \right) \quad (6)$$

Подбор значений параметров  $\eta_0, \gamma, \beta, m$  проведен с использованием имевшихся данных по утечкам через уплотнения трех жидкостей - бензина, дизельного топлива и нефти [9]. Ориентировочное значение  $\eta_0$  принималось по данным справочной литературы, значения параметра  $\alpha = 0.03$  МПа<sup>-1</sup> приняты одинаковыми для всех рассмотренных жидкостей, хотя при необходимости его можно варьировать в зависимости от вида жидкости и ее температуры, причем эти данные можно взять из справочной литературы [7,8] или независимых опытов, не связанных напрямую с прокачкой жидкости через узкие щели. Более точно величину параметра  $\alpha$  можно было бы определить при наличии экспериментальной зависимости распределения давления по потоку  $p = p(x)$ .

Подбор значений параметров  $\gamma, \beta, m$  производился нами следующим образом. По данным опытов устанавливалось соотношение  $h^3 / Q$  для каждого  $i$  — го

опыта, определялись отношения  $(h^3 / Q)_i / (h^3 / Q)_1$  и

далее варьированием параметров  $\gamma, \beta, m$ , а также  $\eta_0$  добивались численного совпадения расчетных и экспериментальных данных по этим соотношениям и по значениям соответствующих расходов. Поскольку сами экспериментально определенные значения расходов являются некоторыми округленными величинами, группирующимися около общей экспериментальной зависимости  $Q(h^3)$  с определенным разбросом, некоторые исходные значения  $Q_i$  также подвергались незначительной корректировке. Специально разработанная программа позволяла подбирать расчетные значения параметров с точностью до десятых долей процента и выше. Достигнутая точность подбора, на наш взгляд, значительно превосходит точность исходных данных и принятых при построении модели предпосылок,

поэтому дальнейшие уточнения представляются нецелесообразными.

В качестве исходных данных использованы имеющиеся в [9] результаты опытов по протечке указанных жидкостей через щели с  $2h \approx 2-4$  мкм под действием давления  $p_0 = 1$  МПа (см. таблицу 1).

Таблица 1

Расход жидкости через уплотнение			
Зазор $2h$ , мкм	Расход $Q$ , см <sup>3</sup> /ч		
	Бензин	Диз. топливо	Нефть
3.75	30.0	20.0	15.0
3.00	20.0	12.0	7.0
2.75	15.0	10.0	5.0
2.50	10.0	5.0	3.0

При подборе условно принято, что температура жидкостей во всех опытах одинакова, не зависит от зазора щели и составляет  $T=20$  °С. Данные по свойствам жидкостей, использованные при подборе, и полученные значения расчетных параметров приведены в таблице 2.

Таблица 2

Жидкость	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Вязкость $\eta_0$ , Н·с/м <sup>2</sup>	Коэффициенты		
			$\gamma$	$\beta_0 = \beta \cdot 10^{-6m}$	$m$
Бензин	800.0	$4.96 \cdot 10^{-4}$	11.2970	1.05025	0.2055
Диз. топливо	840.0	$5.90 \cdot 10^{-3}$	7.5700	1.30910	0.2000
Нефть	900.0	$2.50 \cdot 10^{-2}$	3.4715	1.13700	0.3500

Из них обращают на себя внимание неожиданно маленькие значения параметра  $m$ , которые указывают на весьма узкую область действия поверхностных сил (стенок щели), что в рассматриваемом случае может быть связано с принятым предположением о температурных характеристиках режима течения сред. Графический вид функции  $f(\xi)$  и распределение скорости потока для нефти по высоте щели  $V(\xi)$  приведены на рисунках. 2 и 3. На рисунке 4 показан характер падения давления и касательных напряжений на

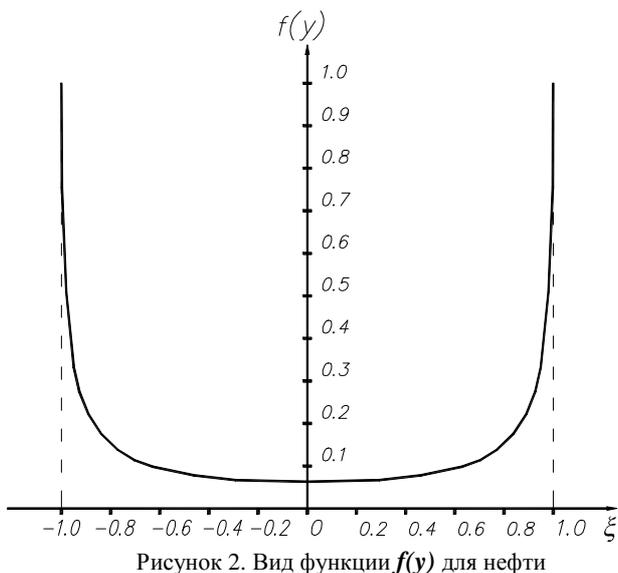


Рисунок 2. Вид функции  $f(y)$  для нефти

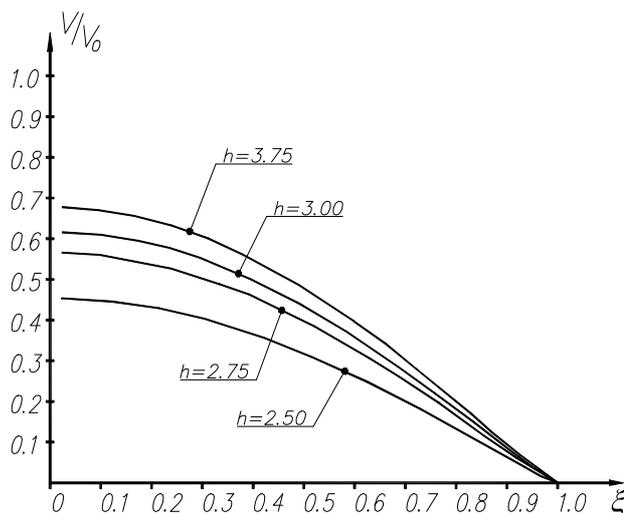


Рисунок 3. Распределения скорости потока по высоте щели

стенках щели вдоль ее продольной оси. Построенная по найденным для нефти числовым данным зависимость расхода от величины зазора  $Q(h^3)$  в более широком диапазоне изменения  $h$  показана на рис. 5 кривой 1. Там же кривой 2 показана соответствующая зависимость для ньютоновской среды.

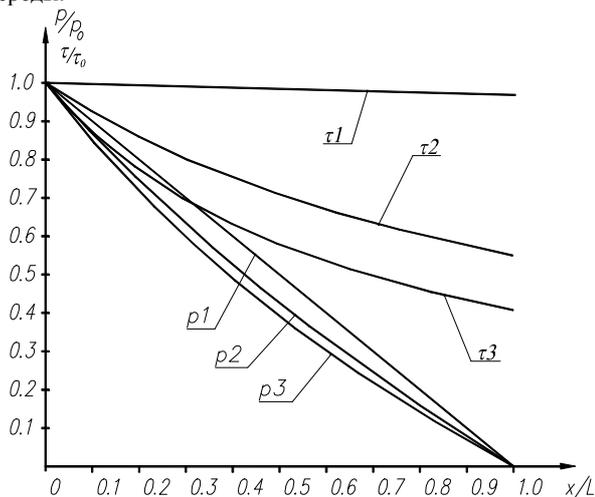


Рисунок 4. Распределение давления и касательных напряжений вдоль щели (1 –  $P_0=1$  МПа, 2 –  $P_0=20$  МПа, 3 –  $P_0=30$  МПа).

Рассмотренная модель легко трансформируется для учета влияния роли центробежных сил, возникающих в объеме жидкости при наличии вращения вала (уплотнения). Учитывая, что радиальная протяженность щели в уплотнениях достаточно мала сравнительно с их средним радиусом, можем в первом приближении считать, что интенсивность сил инерции одинакова во всех точках, а радиальным увеличением площади поперечного сечения пренебречь. В этом случае вместо (6) будем иметь:

$$Q = \frac{2\rho b h^3 \cdot (\exp(\alpha(p_0 - \rho\omega^2 R_c L)) - 1)}{\eta_0 \cdot (1 - \exp(-\alpha\rho\omega^2 R_c L))} \times \rho\omega^2 R_c \left( \Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) d\xi \right) \quad (7)$$

где дополнительно обозначено:  $R_c$  — средний радиус кольца уплотнения,  $b = 2\pi R_c$  — длина окружности кольца по среднему радиусу,  $\bar{\omega}$  — угловая скорость вращения вала.

Для  $n = 7500$  об/мин соответствующая кривая расхода показана на рис. 5 в виде кривой 3 для случая движения жидкости в направлении от наружного диаметра уплотнения к внутреннему. В целом можно заключить, что роль противодействия со стороны центробежных сил движущемуся потоку при заданном уровне внешнего давления невелика, что подтверждается и имеющимися в литературе данными [7].

Отметим, что рассматриваемая модель легко может быть приспособлена и к течению жидкости в каналах замкнутого сечения, например, кругового.

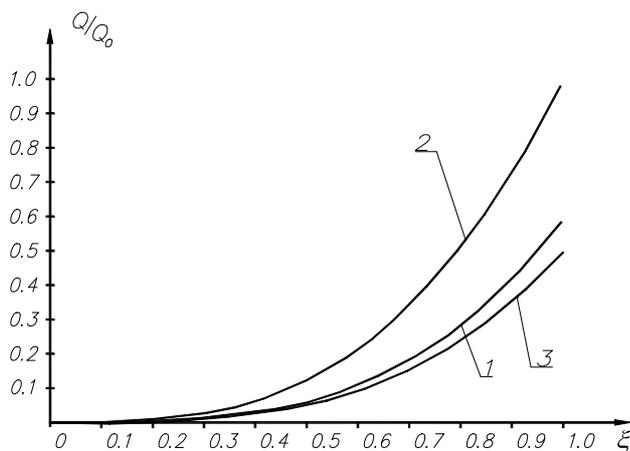


Рисунок 5. Зависимость расхода от высоты щели

УДК 62-762

Голуб В.М., Голуб М.В., Свищев М.А., Холодарь Б.Г.

## МОДЕЛЬ ПРОТЕЧКИ ЖИДКОСТИ В УЗКИХ ЩЕЛЯХ С УЧЕТОМ ТЕМПЕРАТУРЫ РАЗДЕЛИТЕЛЬНОЙ ПЛЕНКИ

Предложенная в [1] модель протечки жидкостей через тонкие микронные щели базируется на зависимости вязкости течения от двух факторов - давления жидкости в зазоре щели и воздействия поля стенок щели, которое сводится к образованию в пристеночных зонах щели цепочек органических молекул нормально к поверхности контакта и образованию вокруг них своеобразной коллоидной структуры. Для описания влияния этой структуры на протечку жидкости предложена и опробована соответствующая зависимость вязкости от поперечной координаты, определяющей положение струйки тока относительно плоскости симметрии щели. Сама щель считается имеющей постоянное сечение, наличие шероховатости поверхности в параметрах модели не рассматривается. Для определения вклада шероховатости в параметры используемой модели необходимо проведение дополнительных экспериментов.

## ВЫВОДЫ

1. Построена модель первого приближения, учитывающая влияние адгезионных свойств пары "стенка-жидкость" на величину расхода жидкости через тонкие щели.
2. Определены параметры модели для нескольких конкретных жидкостей в предположении изотермического режима течения (одинаковая температура жидкости во всех точках потока без учета зависимости ее от величины зазора щели).

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Д.Бакли. Поверхностные явления при адгезии и фрикционном взаимодействии. М.: Машиностроение, 1986,-360с.
2. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963,-472с.
3. Москвитин Н.И. Физико-химические основы процессов склеивания и прилипания. М.: Лесная промышленность, 1974,-192с.
4. Справочник по триботехнике. В 3-х томах. Под общ. ред. М. Хебды и А. В. Чичинадзе. Т1, Т2. М.: Машиностроение, 1989,1990
5. А.Надаи. Пластичность и разрушение твердых тел. Т.2, М.:Мир,1969,-863с
6. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод. М.:1977,-664с
7. Башта Т.М. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. Изд.2-е. М.: Машиностроение, 1982,-423с
8. Справочное пособие по гидравлике, гидромашинам и гидроприводам. (Ред. Б.Б. Некрасов). Минск, Высшая школа, 1985
9. Голуб М.В., Харламенко В.И., Галюк В.Х. Механизм герметизации контактной пары торцового уплотнения. – Вестник машиностроения, -1987, №3, с. 24-26.

Модель приводит к зависимости расхода жидкости через щель вида

$$Q = \int_h dm = \frac{2\rho b h^3 \cdot (1 - \exp(-\alpha p_0))}{\eta_0 \alpha L} \cdot (\Phi(1) - \int_0^1 \Phi(\xi) d\xi)$$

где

$h$  - половина высоты щели,  $L, b$  - ее длина и ширина,  $p_0$  - давление на входе щели (на выходе щели давление принято атмосферным),  $\alpha$  - структурный параметр, определяющий зависимость вязкости от давления,  $\Phi(x)$  - некоторый интеграл, определяющий характер зависимости профиля скорости течения жидкости по высоте щели. Функция  $\Phi(x)$  связана с поперечной координатой частицы жидкости в щели через функцию  $f(y)$ , зависящую от нескольких констант, которые подлежат определению по данным эксперимента. Неньютоновский

Голуб Владимир Михайлович. Аспирант каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Голуб Михаил Владимирович. Зав. каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Свищев М.А. Аспирант каф. «Машиноведения» Брестского государственного технического университета.

Холодарь Б.Г.

БГТУ, Беларусь, г. Брест, ул. Московская 267.