

УДК 678.057.3:532.55

Розглянута течія аномально-в'язких рідин в конічних кільцевих каналах при умові обертання одного з конусів. Досліди проведені з 5% водяним розчином натрієвої солі карбоксилметилцелюлози (КМЦ). Отримані експериментальні результати, що дають можливість скласти розрахункові аналітичні залежності для визначення втрат тиску

Ключові слова: конічний зазор, течія, аномально-в'язка рідина

Рассмотрено течение аномально-вязких жидкостей в конических кольцевых каналах при условии вращения одного из конусов. Опытты проведены с 5% водным раствором натриевой соли карбоксилметилцеллюлозы (КМЦ). Получены экспериментальные результаты, которые дают возможность составить расчетные аналитические зависимости для определения потерь давления

Ключевые слова: конический зазор, течение, аномально-вязкая жидкость

The flow of abnormal-viscous liquids in conical annular channels under condition of one cones rotation is considered. The experiences are spent with 5 % water solution of carboxyl methyl cellulose (CMC) sodium salts. The experimental results which give the chance to make settlement analytical dependences for definition of pressure losses are received

Keywords: conic backlash, flow, abnormal- viscous liquid

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОЙ СИЛЫ НА ТЕЧЕНИЕ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОСТИ В КОНИЧЕСКИХ КОЛЬЦЕВЫХ КАНАЛАХ

О.М. Яхно

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой*

Контактный тел.: (044) 406-82-54, 067-997-16-64

E-mail: o.yahno@kpi.ua

В.С. Кривошеев

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: (044) 454-96-14, 067-719-97-86

E-mail: kryvosheyevi@mail.ru

А.Д. Коваль

Кандидат технических наук, доцент*

Контактный тел.: (044) 454-96-14, 063-227-00-62

E-mail: koval_a_d@ukr.net

*Кафедра прикладной гидроаэромеханики и механотроники Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, корп.1, г. Киев, Украина, 03056

О.В. Кривошеев

Заместитель директора департамента

Министерство экономического развития и торговли Украины

ул. Грушевского, 12/2, г. Киев, Украина, 01008

Контактный тел.: (044) 253-93-94, 050-207-08-65

E-mail: kryvosheyevi@mail.ru

Введение

Течение в узких зазорах между коаксиальными коническими поверхностями является одним из видов течения, где могут существенно проявляться реологические свойства жидкостей. В большей степени это относится к случаю, когда одна из конических поверхностей вращается с некоторой постоянной частотой. Возникает вопрос о зависимости величины скорости сдвига и касательных напряжений у поверхности вращающегося конуса от частоты вращения и о влиянии этих характеристик на потери давления по длине щелевого зазора. Среди факторов, влияющих на данную величину, следует отметить, помимо реологических свойств протекающей жидкости, такие параметры как кривизна конической поверхности, величина центробежных сил, возникающих при вращении одного из конусов, из-

менение площади поперечного сечения конического зазора (т.е. влияние сил инерции от конвективного ускорения).

По мнению ряда исследователей [1], вращение одной (или двух) конических поверхностей может привести к существенному влиянию на поток объёмной силы, например, центробежной, что, в свою очередь, приводит к появлению градиента давления, уравновешивающего её.

Экспериментально показано, что на величину потерь давления в этом случае существенное влияние оказывает величина $\omega^2 r$, где ω – угловая скорость, r – радиус, а уравнение движения ньютоновской жидкости имеет вид

$$\text{grad} \frac{p}{\rho} = \nu \Delta \vec{u} + \frac{\vec{F}}{\rho} - \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} - (\vec{u} \text{ grad}) \vec{u}, \quad (1)$$

в котором \vec{F} – центробежная сила; \vec{u} – скорость; ν – кинематическая вязкость; ρ – плотность.

В зависимости от соотношений между силами инерции от конвективного ускорения, силами вязкого трения и центробежными силами, как видно из уравнения (1), определяется и характер изменения величины давления по длине потока. При малых значениях частоты вращения внутреннего конуса (внешний конус предполагается неподвижным) преобладающее влияние оказывают силы вязкого трения и силы инерции. С ростом частоты вращения, т.е. величины центробежных сил, их влияние может стать доминирующим.

Учитывая эти особенности для оценки данного фактора, в уравнениях движения можно выделить как самостоятельные члены такие слагаемые: $u_x u_y / R$ – соответствующее силе Кориолиса, u_y^2 / R – соответствующее центробежной силе [2]. Кроме того, может быть выделено еще одно слагаемое с множителем $1/R$, которое обуславливает геометрические эффекты рассматриваемого канала. Таким образом, обобщая представленное, можно отметить, что величина градиента давления в данном случае может быть выражена как функция

$$\text{grad } \frac{p}{\rho} = F \left(\frac{u_x u_y}{R}; \frac{u_y^2}{R}; \frac{\text{const}}{R}; \text{реологические свойства жидкости} \right).$$

Цель работы

Для выяснения характера данной зависимости были проведены экспериментальные исследования, посвященные определению изменения давления в конических зазорах, одна из образующих которых (внутренний конус) может вращаться с переменной частотой и проведено их сравнение с течением в кольцевых зазорах с неподвижными стенками.

Исследование

Как известно, течение в конических кольцевых каналах представляет собой течение с изменяющейся по длине площадью поперечного сечения потока. Закон изменения этой площади, зависящей от углов конусности внутреннего и внешнего конуса, является нелинейным.

В качестве примера на рис. 1 представлены каналы реального формирующего инструмента.

Следствием подобного условия является проявление в потоке сил инерции от конвективного ускорения, т.е. дестабилизация течения с переменным по длине градиентом скорости. Точное решение задачи об определении гидродинамических параметров потока в этом случае обычно требует применения численных методов.

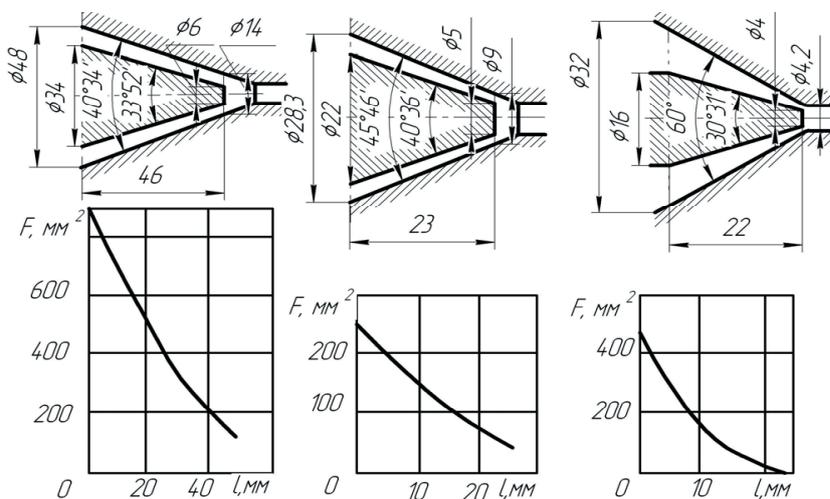


Рис. 1. Графики изменения площади поперечного сечения конических зазоров конических кольцевых каналов формирующих инструментов

Если коническая щель симметрична (рис. 2), т.е. когда углы наклона образующих щель плоскостей одинаковы, а ширина щели равна H , то потери давления для ньютоновской жидкости и неньютоновской жидкости, реологическое поведение которой можно описать законом Оствальда де Вилля, можно определить соответственно по формулам

$$\Delta p_{\text{расч}} = \frac{3\mu Q}{qB \text{tg} \alpha} \left[\frac{1}{H_2^2} - \frac{1}{H_1^2} \right]$$

и

$$\Delta p_{\text{расч}} = \frac{2^n (n+2)}{qB(n+1) \text{ctg} \alpha} \left[\frac{1}{H_2^{n+1}} - \frac{1}{H_1^{n+1}} \right],$$

где ширина щели

$$H_1 = (R_{\text{вх}2} - R_{\text{вх}1}), \quad H_2 = (R_{\text{вых}2} - R_{\text{вых}1}).$$

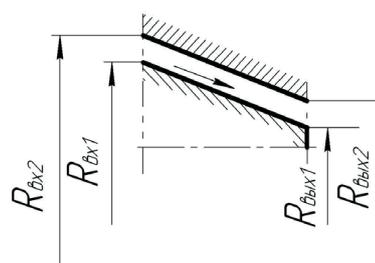


Рис. 2. Расчетная схема течения в конической щели

Изменение расхода осуществляется по аналогии с подобным течением между коаксиальными цилиндрами. Как известно, в этом случае зависимость между $Q_э$ и Q имеет вид

$$\frac{Q_э}{Q} = \left(1 + \frac{3}{2} e^2 \right),$$

где e – величина эксцентриситета; $Q_э$ – расход при наличии эксцентриситета; Q – расход при коаксиальном расположении цилиндров.

При максимальном эксцентриситете $e = e_{\text{max}}$ расход в цилиндрическом зазоре увеличивается в 2,5 раза

(рис. 3), что существенно может сказаться на распределении скоростей и потерях давления.

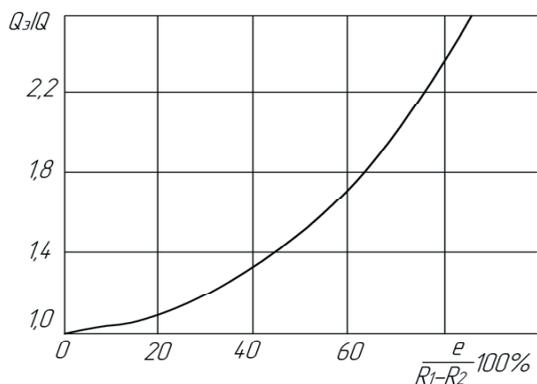


Рис. 3. Зависимость $\frac{Q_2}{Q_1}$ от $\frac{e}{R_1 - R_2} \cdot 100\%$ для канала, образованного двумя цилиндрическими поверхностями

Измерение перепада давлений Δp по длине конического зазора как функции угловой скорости ω (рад/с) при вращении внутреннего конуса показало (рис. 4), что при достаточно низких частотах вращения величина Δp уменьшается с ростом ω , а затем, при достижении некоторого «критического» значения $\omega_{кр}$, перепад давлений начинает возрастать с ростом ω .

Причем данная картина изменения функции $\Delta p = f(\omega)$ характерна именно для неньютоновских жидкостей.

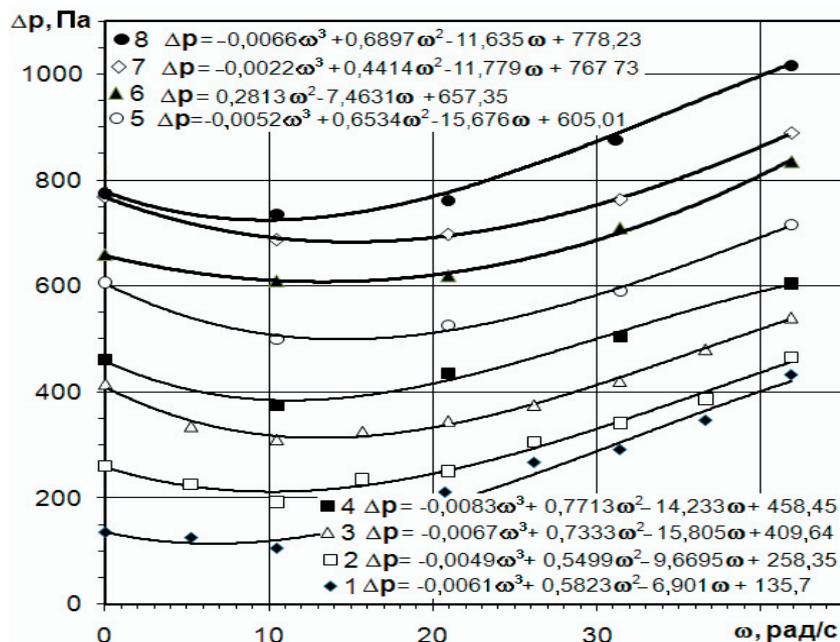


Рис. 4. Зависимость потерь давления в коническом кольцевом канале от угловой скорости вращения внутреннего конуса при числах Рейнольдса во входном сечении Re_1 : 1-0,195; 2-0,48; 3-0,791; 4- 1,13; 5-1,605; 6-2,42; 7-2,85; 8-3,74

В случае, представленном на рис. 4, приведены результаты опытов, связанные с течением 5% водных растворов натриевой соли карбоксиметилцеллюло-

зы (КМЦ), для которых характерно реологическое поведение жидкостей Оствальда де Виля с их особенностями при течении [3]. Уменьшение перепада давлений при сравнительно небольших значениях частоты вращения можно, по-видимому, объяснить пристенными эффектами в реологической среде, связанными с уменьшением касательных напряжений у стенки; однако, с ростом частоты вращения наблюдается значительный рост напряжений сдвига и, как следствие, увеличение перепада давлений. Кроме того, характер пристенного течения неньютоновских жидкостей (особенно полимеров) может зависеть так же от пристенного скольжения при определенных реологических свойствах среды и диапазона частот вращения внутреннего конуса. Очевидно, что при росте частоты вращения профиль скоростей в зазоре выравнивается и пристенное скольжение исчезает.

Обработка экспериментальных данных позволила для функции $\Delta p = f(\omega)$ получить следующую зависимость

$$\Delta p = a_0 \omega^3 + b \omega^2 + c \omega + d = \Delta p_{вр} + d,$$

где d – параметр, характеризующий перепад давлений при отсутствии вращения внутреннего конуса, а $\Delta p_{вр}$ – характеризует перепад давлений, обусловленный вращением внутреннего конуса.

Уравнения кривых $\Delta p = f(\omega)$ при соответствующих значениях Re_1 представлены на рис. 4.

Учитывая, что напряжение сдвига τ является функцией Δp , на основании этих зависимостей можно найти выражение для τ .

Например, предполагая, что справедливой для рассматриваемого случая может быть модель, описанная в работе [4]

$$\Delta p = -\frac{1}{r} \frac{d}{dr} (\tau r_x)$$

для неподвижного конуса, а в случае вращения появляется

дополнительные напряжения $\tau_4(\omega)$. В приведенном выражении для Δp (представлено в размерном виде) коэффициенты имеют следующие

размерности: $d \left[\frac{H}{M^2} \right]$; $c \left[\frac{H \cdot c}{M^2} \right]$;

$b \left[\frac{H \cdot c^2}{M^2} \right]$; $a_0 \left[\frac{H \cdot c^3}{M^2} \right]$. Таким образом,

судя по размерностям приведенных параметров, можно предположить, что их физический смысл заключается в следующем: d – перепад давлений в канале при отсутствии вращения внутреннего конуса; c – динамическая вязкость; b – сила, отнесенная к квадрату скорости, и, наконец, коэффициент a_0 – работа

[Н·м], отнесенная к кубу скорости.

Причем следует отметить, что коэффициенты a_0 и c в выражение входят со знаком “-”, что дает возмож-

ность сделать предположение, что вязкость и работа, совершаемая жидкостью при вращении конуса, оказывают отрицательное воздействие на Δp , т.е. при определенных условиях способствуют уменьшению перепада давлений.

На основании данного анализа можно перейти к определению напряжений сдвига τ у стенки при рассматриваемых частотах вращения $\tau_{cr} = f(\Delta p, \omega)$.

Наличие экстремальных условий течения при низких частотах вращения конуса подтверждается графическими зависимостями потерь давления $\Delta p_{вр} = a_0\omega^3 + b\omega^2 + c\omega$ от отношения чисел Рейнольдса $\frac{Re_{окр}}{Re_1}$, вычисленных по окружной скорости осевого течения во входном сечении (рис. 5).

При малых значениях $Re_{окр}$ наблюдается уменьшение перепада давлений, однако при достижении некоторого критического значения $\frac{Re_{окр}}{Re_1}$ (в рассматриваемых опытах он колеблется в пределах $10 \leq \frac{Re_{окр}}{Re_1} \leq 20$) перепад давлений с ростом $\frac{Re_{окр}}{Re_1}$ возрастает. Причем, величина критического значения этого числа в значительной мере зависит от реологических свойств протекающей жидкости. Обработка экспериментальных данных, приведенных на графике (рис. 5), показала, что структура формулы для определения Δp аналогична той, что показана на рис. 4, а именно

$$\Delta p = a_0 \left(\frac{Re_{окр}}{Re_1} \right)^3 + a_1 \left(\frac{Re_{окр}}{Re_1} \right)^2 + a_2 \left(\frac{Re_{окр}}{Re_1} \right) + a_3,$$

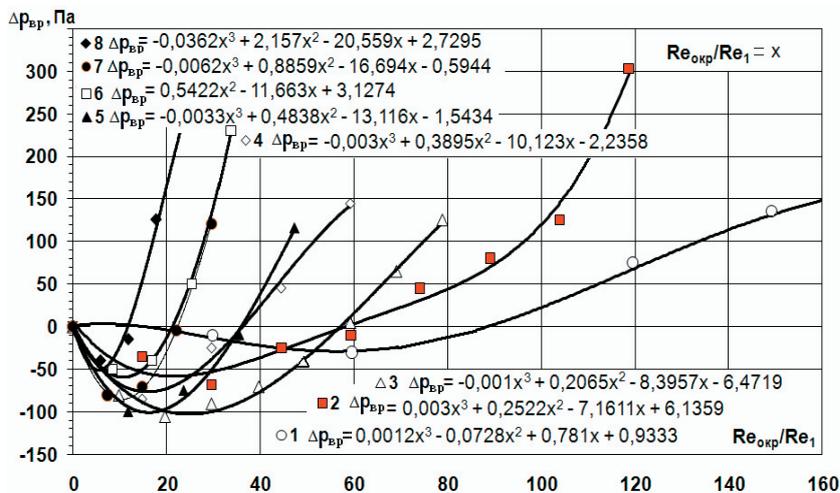


Рис. 5. Зависимость составляющей потерь давления, обусловленной вращением внутреннего конуса, от соотношения окружного числа $Re_{окр}$ и числа Re_1 во входном сечении канала при Re_1 : 1-0,195; 2-0,48; 3-0,791; 4-1,13; 5-1,605; 6-2,42; 7-2,85; 8-3,74

где a_0, a_1, a_2, a_3 – определенные экспериментально коэффициенты, имеющие размерность давления.

Выводы

Проведенные исследования вязких и аномально-вязких жидкостей в поле действия центробежных сил и сил инерции от конвективного ускорения позволили сделать заключение о степени их влияния на гидравлические потери энергии.

Получены на основании эксперимента аналитические зависимости для расчета потерь давления в конических кольцевых каналах при условиях вращения одного из конусов.

Сделана попытка объяснения особенностей характера изменения потерь давления по длине канала в зависимости от реологических свойств жидкости.

Литература

1. Левич В.Г. Физико-химическая гидромеханика/ В.Г.Левич –М.: Изд-во Ф-МЛ, 1959. –699 с.
2. Бетчов Р, Криминале В. Вопросы гидродинамической устойчивости. / Р.Бетчов, В.Криминале –М.: Мир, 1971. –350 с.
3. Литвинов В.Г. Движение нелинейно-вязкой жидкости/ В.Г.Литвинов –М.: Наука, 1982. -373 с.
4. Технология нанесения покрытия на поверхности / О.М.Яхно, С.Г.Кравченко, В.С.Кривошеев, А.П.Полывяный, В.С.Бочковский –К.: Техніка, 1993. -121с.