

УДК 532.516

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ НЕНЬЮТОНОВСКИХ ЖИДКОСТЕЙ 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

Д.Н. Кашуба

Аспирант*

Контактный тел.: (044) 454-96-14, 097-468-65-31

E-mail: koshadn@gmail.com

*Кафедра прикладной гидроаэромеханики и мехатроники

Национальный технический университет Украины «Киевский

политехнический институт»

пр. Победы, 37, 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

В статті містяться результати фізичного моделювання гідродинаміки потоку аномально-в'язкої рідини в конічному кільцевому каналі з паралельними твірними конусів і різним законом зміни площі поперечного перерізу каналу по довжині, запропоновані залежності коефіцієнта гідравлічного тертя від числа Рейнольдса

Ключові слова: конічний кільцевий канал, течія, аномально-в'язка рідина, гідравлічний опір

В статье представлены результаты проведенного физического моделирования гидродинамики потока аномально-вязкой жидкости в коническом кольцевом канале с параллельными образующими конусов и различным законом изменения площади поперечного сечения канала по длине, предложены зависимости коэффициента гидравлического трения от числа Рейнольдса

Ключевые слова: конический кольцевой канал, течение, аномально-вязкая жидкость, гидравлическое сопротивление

1. Введение

Актуальной проблемой в целом ряде отраслей промышленности является проблема, связанная с гидродинамикой потока в конических и цилиндрических зазорах. Особенно она актуальна для потоков аномально-вязких жидкостей. Изучение таких течений, которые, как правило, являются нестабилизированными, особенно важно для случаев, когда необходимо знать время пребывания жидкости в рассматриваемом канале и напряжение действующей жидкости.

Интенсивное развитие химических технологий делает актуальными задачи гидродинамики потока аномально-вязких жидкостей в цилиндрических кольцевых каналах и конических кольцевых каналах. К сожалению, в большей части исследований такие задачи мало изучены, несмотря на свою актуальность.

В целом ряде принципиально важных задач химической технологии из области переработки полимерных материалов в изделия особое значение приобретают вопросы расчета потерь энергии в их рабочих элементах. Особенно они актуальны для потоков аномально-вязких жидкостей. В данной работе рассматриваются потери энергии при течении аномально-вязких

жидкостей в конических щелевых каналах, которые есть в различного рода химических аппаратах, экструзионных установках, формующих инструментах для изготовления рукавных пленок и т. д. [1, 2].

2. Постановка задачи

Особенностью подобных течений является необходимость учёта влияния на поток не только реологических свойств жидкости, но и влияние сил инерции от конвективного ускорения. В этой статье сделана одна из первых попыток провести подобные исследования и получить представления и рекомендации по методам расчёта параметров подобных течений.

3. Экспериментальные данные и их обработка

В основу работы положены экспериментальные исследования, позволяющие провести физическое моделирование гидродинамики потока в двусвязных областях с различными углами конусности образующих поверхностей.

Особенностью рассматриваемого типа каналов (даже с одинаковыми углами конусности образующих) является то, что изменение площади поперечного сечения канала по длине приводит к изменению средней скорости потока, деформации эпюры скоростей, а следовательно, к необходимости учёта влияния сил инерции от конвективного ускорения при корректном расчёте гидравлических потерь энергии. К сожалению, в литературе сложно найти исследования, соответствующие данной постановке задачи. В связи с этим возникла необходимость проведения физического моделирования с целью уточнения расчётных зависимостей для подобных потоков.

Исследования проводились на стенде, который показан на рис. 1. Основным узлом стенда является модель кабельной головки (рис. 2). Рабочий участок спроектирован с учетом предположений, связанных с геометрическими параметрами аналога модели кабельной головки и формой распределительной зоны. Главные зоны модели кабельной головки: распределительный участок (цилиндрический кольцевой канал), образованный поверхностями корпуса головки 1 и распределителя 2, в который модельная жидкость подается через осевые подводы в корпусе головки; кольцевой конический участок, образованный двумя коническими соосными поверхностями дорна 3 и матрицы 4, которые параллельны; формирующий участок, где течение происходит в зазоре между проволокой 5 (или жилой), которую протягивают, и матрицей 6.



Рис. 1. Фото экспериментального стенда

Все эти три типа каналов сделаны на рабочем участке стенда таким образом, чтобы можно было производить измерения гидродинамических параметров потока в них, а также изменять при необходимости их геометрические характеристики, смещая вдоль оси Oz внешний конус, придавая размеру Z различные значения.

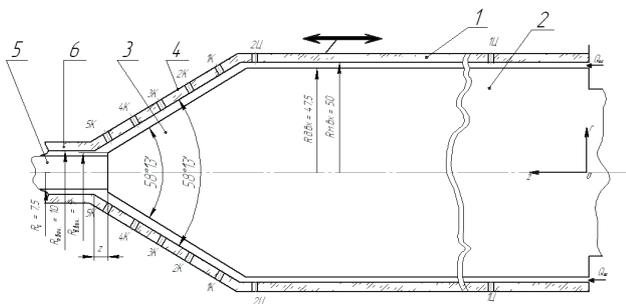


Рис. 2. Упрощенная модель кабельной головки

В качестве модельных жидкостей использовались растворы натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) в 0.5%-ом водном растворе NaOH различных концентраций (6%, 7%, 8%, 9%, 10%), реологический анализ которых был проведен на ротационном вискозиметре «Реотест - 2». Данные жидкости за своими реологическими особенностями моделируют жидкости Оствальда де Виля (псевдопластик) [3] с индексом течения, который изменяется в пределах $n = 0.6 - 0.8$, а консистентные постоянные – в пределах $k = 0.2 - 2.5$ [кгсⁿ/м²] (рис. 3).

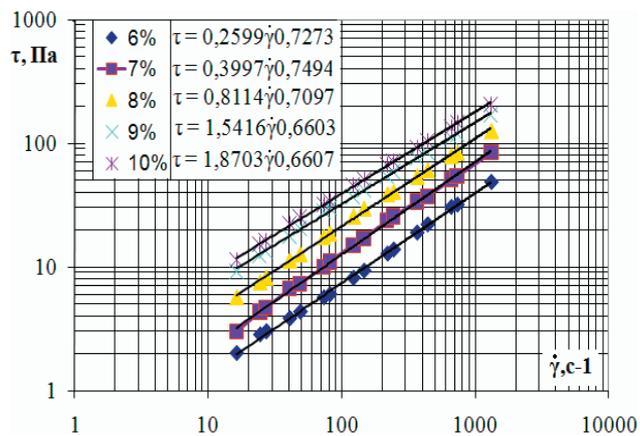


Рис. 3. Реологические кривые растворов КМЦ в 0,5 %-ом водном растворе NaOH при температуре $t = 24^\circ\text{C}$

В статье представлены полученные в результате эксперимента зависимости, характеризующие потери энергии в конических кольцевых каналах в зависимости от реологических свойств модельных жидкостей и на их основе даны предложения по расчёту коэффициента гидравлического трения.

Исследования проводились в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 0.016 - 30$. На основании экспериментальных данных были получены графические зависимости изменения давления p по длине x/l (рис. 4), которые могут быть описаны полиномом третьей степени

$$p = a_1 \left(\frac{x}{l}\right)^3 + a_2 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{l}\right) + a_4,$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – коэффициенты, имеющие размерность давления, для различных значений концентраций представлены в табл. 1.

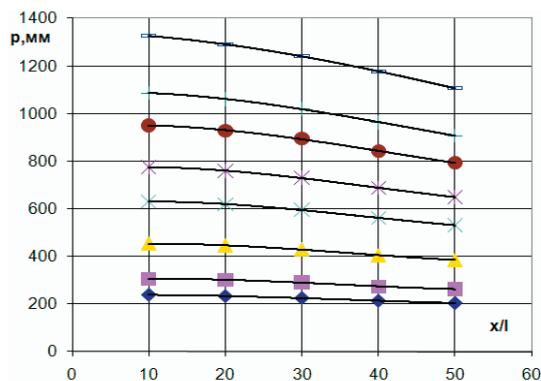


Рис. 4. Зависимость изменения давления p по длине x/l

Таблица 1

Значения коэффициентов полинома для описания

$$\text{зависимости } p = f\left(\frac{x}{l}\right)$$

Re	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄
0,028922	0.0006	-0.1136	-0.494	1341.3
0,089797	0.0012	-0.163	1.5488	1085.8
0,221205	0.0014	-0.1745	2.2679	943.5
0,608559	0.0015	-0.1764	2.7857	763
1,104572	0.0014	-0.158	2.7321	617.3
1,928434	0.0011	-0.1241	2.2464	442
2,483756	0.001	-0.0995	1.9095	295.7
2,927702	0.0004	-0.042	0.4929	237.3

С целью определения гидравлических потерь в рассматриваемом типе каналов на основании эксперимента также были получены зависимости числа Эйлера *Eu* от числа Рейнольдса *Re* (рис. 5). Как видно на рис. 5, между критериями Эйлера *Eu* и Рейнольдса *Re* существует обратная зависимость, описываемая гиперболическим законом $Eu = \frac{C}{Re^B}$, в котором для рассматриваемого случая $C = 156,47$ и $B = -1,0421$.

Следует отметить, что изменяя смещение *z* (рис. 2), осуществляем изменение поперечного сечения канала по длине конического зазора.

Представлены зависимости коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса *Re* для конических кольцевых каналов с различным законом изменения площади поперечного сечения по длине.

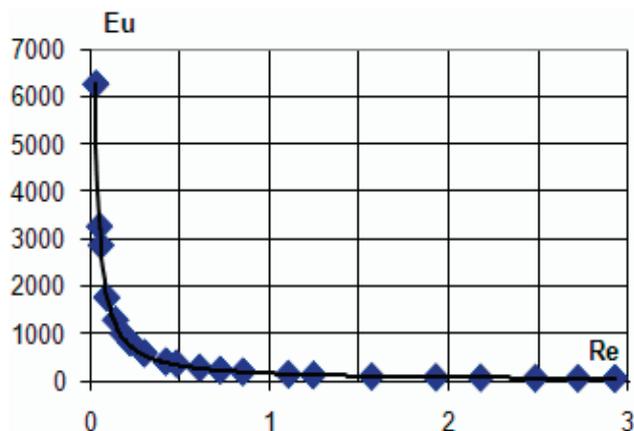


Рис. 5. Зависимости числа Эйлера *Eu* от числа Рейнольдса *Re* для 10%-го раствора КМЦ в 0,5%-ом водном растворе NaOH при смещении $z = 8,8$ мм

Кривые *Eu* от *Re* положены в основу для определения коэффициента гидравлического трения λ (рис. 6)

$$\lambda = A/Re^m .$$

В рассматриваемой формуле показатель степени *m* является функцией величины *z* и зависит от значения изменения площади поперечного сечения канала.

Таблица 2

Значения показателя степени *m* и постоянной *A* в формуле коэффициента гидравлического трения λ для 10%-ой концентрации КМЦ в 0,5%-ом водном растворе NaOH при различных смещениях *z*

Z, мм	A	m
8.8	191.82	-1.0421
9.8	175.03	-1.0744
10.8	153.28	-1.0277
11.8	146.99	-1.1686
12.8	152.62	-1.0607
13.8	130.91	-1.003

В представленной формуле величины *A* и *m* являются так же функциями градиента скорости $\frac{Q}{\pi R^3}$, и, следовательно, индекса течения жидкости при заданном угле конусности, то есть зависят от ее реологических свойств, что подтверждается представленными на рис. 6 зависимостями.

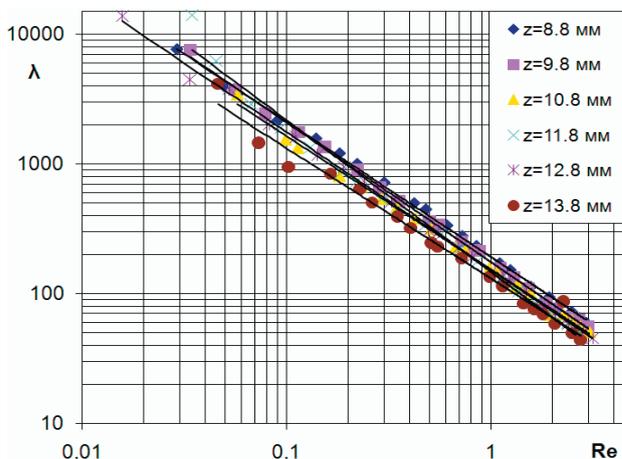


Рис. 6. Зависимость коэффициента гидравлического трения λ от числа Рейнольдса *Re* для 10%-ой концентрации КМЦ в 0,5%-ом водном растворе NaOH при различных смещениях *z*

Аналитическое описание этой зависимости можно представить в виде полиномов, соответствующих различным значениям *z*:

$$\lambda = 191,82 Re^{-1,0421} ,$$

$$\lambda = 175,03 Re^{-1,0744} ,$$

$$\lambda = 153,28 Re^{-1,0277} ,$$

$$\lambda = 146,99 Re^{-1,1686} ,$$

$$\lambda = 152,62 Re^{-1,0607} ,$$

$$\lambda = 130,91 Re^{-1,003} .$$

Таким образом, разработанный экспериментальный стенд и проведенные на нем эксперименты по течению anomalно-вязких жидкостей в зазоре между коническими поверхностями показали, что течение в

подобных каналах является нестабилизированным и, как следствие этого, изменение давления p является нелинейной функцией от длины x/l .

Следует отметить, что на подобного рода нелинейность может оказывать влияние дестабилизация потока в щели, которая связана с изменением площади поперечного сечения щели по длине (даже при одинаковых углах конусности). Обработка экспериментальных данных показала, что структура формулы по определению коэффициента гидравлического трения λ аналогична формуле Метцнера для течения ньютоновской жидкости в канале.

Такие исследования могут быть полезны при проектировании оборудования для переработки полимерных материалов в экструзионных установках.

4. Выводы

Таким образом, на основании эксперимента показано, что течение в конических зазорах является нестабилизированным, а следовательно, на жидкость действуют силы вязкости и силы инерции от конвективного ускорения. Дестабилизация потока обусловлена изменением по длине щели площади поперечного сечения и, как следствие этого, изменением средней скорости и кинетической энергии.

Данный факт оказывает существенное влияние на величину коэффициента гидравлического трения λ , который может быть определен для ламинарного режима течения по предлагаемой степенной зависимости.

Литература

1. Торнер, Р.В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета) [Текст] / Р.В. Торнер.- М.: Химия, 1972.- 456 с.
2. Технология нанесения покрытий на поверхности [Текст]/О.М. Яхно, С.Г. Кравченко, В.С.Кривошеев, А.П. Польшивный, В.С. Бочковский.-К.: Техніка, 1993.-120 с.
3. Яхно, О.М. Основы реологии полимеров [Текст] / О.М. Яхно, В.Ф. Дубовицкий.- К.: Издательское объединение «Вища школа», 1976.- 188 с.

Abstract

Intensive development of chemical technology makes current problems of hydrodynamics flow abnormally viscous fluids in cylindrical annular channels and conical annular channels. Feature of such flows is the need to consider the influence of the flow not only rheological properties of the fluid, but also the effect of the inertial forces of the convective acceleration.

This article has one of the first attempts to conduct similar investigations of and to obtain views and recommendations on how to calculate the parameters of such flows. In the basis of work the experimental studies to allow a physical simulation of hydrodynamics flow in doubly connected domains with different angles of taper forming surfaces.

The article presents the resulting experimental dependence, characterized by a loss of energy in conical annular channels, depending on the rheological properties of model fluids and their offers on the basis of the calculation of the coefficient of hydraulic friction. Are presented according to the coefficient of hydraulic friction λ of the Reynolds number Re for conical annular channels with various law changes the cross-section along its length. Such studies may be useful in the design-governmental equipment for the processing of polymeric materials in the extrusion line

Keywords: conical annular channel, current, abnormally viscous fluid, hydraulic resistance