

*Представлено аналіз закономірностей нестабілізованої течії аномально-в'язких середовищ в каналах технологічного обладнання. Наведено методіку гідродинамічного розрахунку формуючих частин машини. Визначено взаємозв'язки між конструктивними та технологічними параметрами устаткування*

*Ключові слова: нестабілізована течія, перехідні ділянки каналів*

*Представлен анализ закономерностей нестабилизированного течения аномально-вязких сред в каналах технологического оборудования. Приведена методика гидродинамического расчета формирующих частей машины. Определены взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами оборудования*

*Ключевые слова: нестабилизированное течение, переходные участки каналов*

*The analysis of unregulated flow patterns of abnormal-viscous liquids in channels of technological equipment is shown. The methodology of hydrodynamic calculation of forming parts of the equipment is given. The relationship between structural and technological parameters of the equipment is determined*

*Keywords: unregulated flow, transitional parts of channels*

УДК 532.543

## ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ФОРМУЮЩЕЙ ЧАСТИ МАШИНЫ ПО ПЕРЕРАБОТКЕ АЦЕТАТА ЦЕЛЛЮЛОЗЫ

С. В. Носко

Кандидат технических наук, доцент\*

Контактный тел.: (044) 422-27-57,

067-811-32-88

В. А. Булыгин\*

Контактный тел.: (044) 403-17-70,

063-136-77-06

\*Кафедра прикладной

гидроаэромеханики и механотроники

Национальный технический университет

Украины «Киевский политехнический

институт»

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

### Введение

В химической технологии для соединения каналов различной формы или площади поперечного сечения применяются переходные участки различных типов, обеспечивающие переход потока от прямоугольного сечения к круглому, от круглого к эллиптическому, от квадратного к прямоугольному и т.д. [1,2]. Все встречающиеся на практике переходные участки целесообразно, по мнению авторов, классифицировать по следующим основным признакам: по изменению площади поперечного сечения по длине  $f = f(x)$  (по этому признаку все переходные участки можно разделить на конфузорные  $df/dx < 0$ , диффузорные  $df/dx > 0$  и с постоянной площадью поперечного сечения  $df/dx = \text{const}$ ) и по характеру изменения формы поперечного сечения переходов вдоль оси (форма поперечного сечения может оставаться постоянной или изменяться). Кроме этих двух основных признаков, переходные участки могут отличаться по форме образующих стенок, которые бывают прямолинейными, криволинейными, ступенчатыми и т.п.

Простейшими переходными участками, с которыми обычно сопоставляют переходы более рациональных форм, является внезапное сужение (расширение) потока.

Структуру потока в области внезапного сужения (расширения) можно исследовать, основываясь на представлениях о гидродинамическом начальном

участке, на котором эпюра скоростей деформируется обычно от произвольной во входном сечении до соответствующей полностью развитому течению в конце участка. На начальном участке наблюдается градиент скорости по длине положительный. На участке перед переходом возможно также деформирование эпюры скоростей. В ядре потока течение может быть замедленным, а градиент скорости по длине отрицательным.

Трудности исследования уравнений движения, описывающих нестабилизированное течения вязкой жидкости на участках до и после переходов, связаны с их нелинейностью. Аналитический анализ данных уравнений для канала произвольной формы с учетом сил инерции в потоке достаточно полно представлен в работе [3,4].

Из данных исследований следует, что для канала произвольной формы с учетом сил инерции в потоке потери давления представленные в критерии Эйлера:

$$E_u = 0,5n[(C_f * x)/D_{np} + k(x)] , \quad (1)$$

где  $n$  – коэффициент, учитывающий реологические свойства среды;

$C_f$  – коэффициент гидравлического трения, соответствующий стабилизированному течению по длине канала  $L$ ;

$D_{np}$  – приведенный диаметр канала;

$$k(x) = 2\left[\frac{1}{S}\right] \int (U_x / U_{cp})^2 dS - 1 - \left[ \frac{2\nu}{S U_{cp}} \right] \int_0^L dL \oint \frac{\partial}{\partial n} \left[ \frac{U_x - U_{ст.}}{U_{cp.}} \right] / U_{cp.} ] dx \quad (2)$$

- дополнительный параметр;
- % – соответствующая координата;
- S – площадь поперечного сечения;
- $U_x, U_{cp}$  – локальная и средняя скорости;
- $U_{ст.}$  – скорость жидкости при стабилизированном течении;
- $\nu$  - кинематическая вязкость;
- $\mathbf{x}$  - элемент контура поперечного сечения.

Поправочный коэффициент: (E) имеет следующее физическое толкование: так как он равен сумме слагаемых в формуле (2), то он должен учитывать изменение количества движения на рассматриваемом участке канала и характеризует разность между величинами поверхностного трения и инерции нестабилизированного течения. Для каналов с прямоугольным поперечным сечением для гидродинамического начального участка при соотношении сторон 1:1 (квадрат)  $k=1,5515, CfRe=56,9$ ; при отношении сторон 1:2  $k=1,383, CfRe=62,219$ . Ограничения, которые накладывались при получении зависимостей (1) и (2), позволяют использовать данные результаты при описании течения на гидродинамическом предначальном участке, т.е. на участке перед местным сопротивлением, где наблюдалось инерционное течение жидкости.

С целью определения зависимости, описываемой уравнением (1), на экспериментальной установке замкнутого типа (рис. 1) были получены гидродинамические характеристики инерционного течения в области местных сопротивлений.

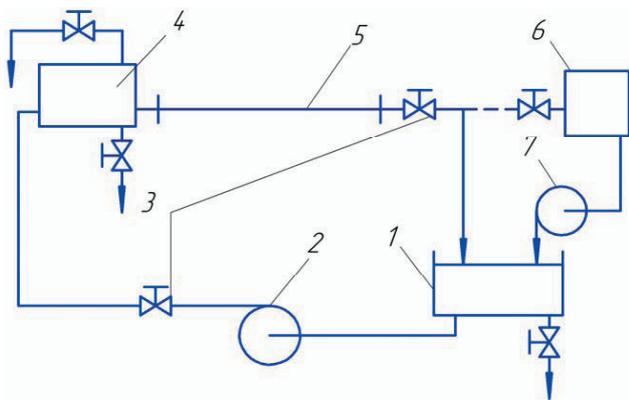


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – бак; 2 – основной насос; 3 - вентили; 4 – успокоительная камера; 5 – экспериментальный участок; 6,7 – бак и насос соответственно

Конструкция установки позволяла исследовать переходные участки нескольких типов с изменяющейся формой и площадью поперечного сечения. Предметом проведенного исследования являлось внезапное сужение (расширение) с соотношением  $S_1/S_2=3, S_2/S_1=1/3$  и  $S_2/S_1=1/2$ . Кроме того конструкция экспериментального участка предусматривала установку специальных вставок позволяющих изменять условия входа в канал с меньшим поперечным сечением.

Рабочие участки экспериментальной установки представляли собой горизонтально расположенные каналы и были выполнены из оргстекла, что позволило применить методику визуализации течения с последующей регистрацией вводимый в поток частиц [4].

В качестве рабочей среды использовалась вода, водные растворы натриевой соли карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и поливинилового спирта (ПВС) различной концентрации. Полученные результаты реологических исследований показали, что данные растворы являются псевдопластичными жидкостями (табл. 1).

Таблица 1

Результаты реологических исследований

Тип жидкости (водный раствор)	Напряжение сдвига, Н/м <sup>2</sup>	Градиент скорости, с <sup>-1</sup>	Коэффициент вязкости, Па*с
КМЦ – 3 %	1,5875	27,0	0,059151
	5,3975	80,5	0,067038
	13,9700	241,5	0,057837
КМЦ – 5%	2,5400	16,200	0,15679
	7,3025	48,623	0,15257
	19,05	145,861	0,130658
ПВС – 2 %	1,96	243	0,0081
	3,36	437	0,0077
	5,04	729	0,0069
ПВС – 3%	2,52	243	0,0104
	6,16	729	0,0084
	9,24	1312	0,007

Анализ экспериментальных данных показал, что перед переходным участком наблюдалось четко выраженные вторичные течения. Было установлено, что величина области вторичных течений  $L_1$  зависит не только от числа Re но и от реологических свойств жидкости, условий входа в канал с меньшим поперечным сечением и размеров области сжатого потока на исследуемом участке (рис. 2).

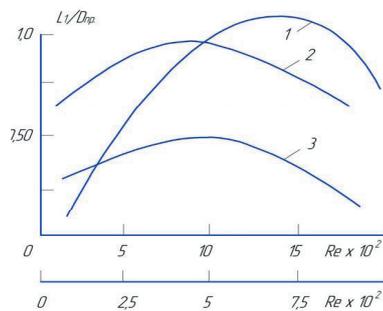


Рис. 2. Зависимость безразмерной величины области вихреобразования  $L_1/D_{np}$  от числа Re для различных сред : 1 – вода; 2 – ПВС (3%-й раствор); 3 – КМЦ (5%-й раствор)

Результаты проведенных исследований, дают возможность утверждать, что наличие области вихреобразования  $L_1$  приводит к нестабилизированному характеру течения жидкости еще и на некотором участке  $L_2$ . Экспериментальные данные показали, что при коэффициенте сужения, равном 3, длина участка  $L_2$  при ньютоновской жидкости является функцией числа Re, а для неньютоновской жидкости, обладающей вязкоупругими свойствами от общего числа Рейнольдса  $Re$ .

На рис. 3 представлена зависимость, характеризующая перепад давления на участке  $L_2$  как функция числа  $Re$ , т.е.  $Eu = f(Re)$ .

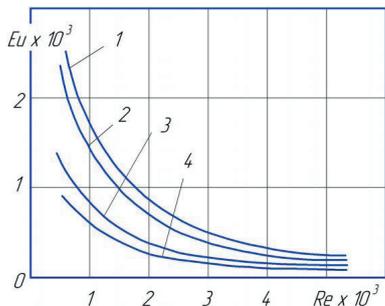


Рис. 3. Зависимость  $Eu = f(Re)$  при течении 3%-ного водного раствора КМЦ на предначальном участке перед местным сопротивлением в каналах квадратного и прямоугольного поперечных сечений соответственно. 1,2 – экспериментальные кривые для инерционного течения; 3,4 – кривые, рассчитанные по формулам для стабилизированного течения

Для каналов квадратного и прямоугольного сечений данная зависимость носит гиперболический характер.

В качестве сравнения на этом рисунке показана аналогичная зависимость для стабилизированного течения. Сопоставление кривых позволяет установить степень влияния сил инерции на участке  $L_1 + L_2$ , названном предначальным, на распределение гидростатического давления по длине. Если в соответствии с данными работы [3] перепад давления на участке длиной  $L_1 + L_2$  при стабилизированном течении определяется для канала  $\Delta P_{ст} = (68LU^2) / (ReD_{пр. q})$ , то для предначального участка

$$\Delta P_1 = \Delta P_{ст} + \Delta \phi_1(Re), \tag{3}$$

где  $\Delta \phi_1(Re)$  - дополнительные потери энергии, связанные со структурой потока на предначальном участке.

При течении на предначальном участке прямоугольного и квадратного сечений соответственно для исследуемых жидкостей:

$$\Delta \phi_1(Re) = 68,40 / (Re^{1,32}) \tag{4}$$

$$\Delta \phi_2(Re) = 51,42 / (Re^{1,21}) \tag{5}$$

а их графическая зависимость имеет вид, показанный на рис. 4. Таким образом, для нестабилизированного течения потери энергии в канале с прямоугольным поперечным сечением  $Eu = (1/Re)(53,17 + 68,40Re^{-2,32})$ . Размеры предначального и начального участка для местного сопротивления данного вида существенно различаются.

Течение жидкости в области внезапного расширения потока изучено более подробно и существующие формулы для определения потерь энергии при внезапном расширении потока хорошо согласуются с экспериментальными данными. Вместе с тем на участке перед внезапным расширением так же, как и при перед внезапным сужением, наблюдается область инерцион-

ного течения. Как показали результаты экспериментальных исследований, эта область существует при высоких числах  $Re$ . Например, при течении воды ( $Re < 1500$ ) существенных изменений в потоке на исследуемом участке по сравнению со стабилизированным течением не наблюдалось.

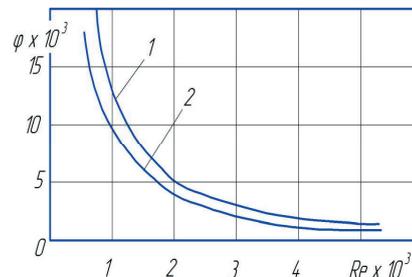


Рис. 4. Зависимость функций  $\eta = 0,85$  и  $\phi_2$  от числа  $Re$  соответственно для каналов с квадратным (1) и прямоугольным (2) поперечными сечениями

Однако предначальный участок наблюдается при течении 3%-го водного раствора КМЦ в канале квадратного поперечного сечения перед внезапным расширением (коэффициент расширения равен 1/3). Зависимость гидростатического давления, представленного в критерии Эйлера, от числа  $Re$  на этом участке показана на рис.3 (кривая 1). По аналогии со случаем внезапного сужения перепад гидростатического давления при течении жидкости на предначальном участке, расположенном перед внезапным расширением, можно записать в виде

$$\Delta P_2 = \Delta P_{ст} + \Delta \phi_2(Re), \tag{6}$$

где  $\Delta \phi_2(Re) = 51,422 / (Re^{1,21})$  для водных растворов КМЦ, а  $\Delta P_{ст}$  определяется по формуле, приведенной ранее.

Таким образом, перед исследованными переходными участками, как показал эксперимент, возможно существование участка с инерционным течением жидкости. Гидродинамические потери энергии на этом участке могут определяться так же, как и на гидродинамическом начальном участке; существует лишь количественное различие. В этом можно убедиться, сопоставив формулу (1) с формулами (3) и (6), структура которых одинакова, а функция  $\phi(Re)$   $\Delta \phi(Re)$  имеет то же смысловое значение, что и функция  $\kappa(x)$  в уравнении (1). Следовательно, для определения  $\phi(Re)$ , кроме зависимостей (4) и (5), справедливо также выражение (2).

Размеры предначального участка зависят от вида переходного участка и от условий входа потока в него, но, как правило, они оказываются меньше длины начального участка.

Результаты данных исследований нашли практическое применение при разработке методики гидродинамического расчета формирующей части машины по переработки ацетата целлюлозы.

Предлагаемая методика основана на результатах решения уравнения движения, описывающих нестабилизированное течение с использованием экспериментальных данных [4].

При гидродинамическом расчете формирующей части машины (рис. 5) будем считать, что поток тех-

нологической среды изотермичен на всех расчетных участках; реологические и физико-механические свойства ацетата целлюлозы постоянны на протяжении всего времени протекания технологического процесса.

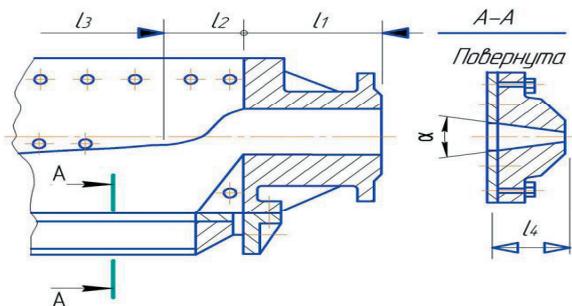


Рис. 5. Формующая часть машины по переработке ацетата целлюлозы (продольный разрез)

Исходя из закономерностей гидродинамический процессов, протекающих на каждом участке с отличающимися геометрическими характеристиками, расчетную часть машины по переработке ацетата целлюлозы следует разделить на четыре принципиально различных зоны (рис. 5):

- зона нестабилизированного течения, расположенная перед местным сопротивлением  $l_1$ ;
- внезапное расширение зона  $l_2$ ;
- зона нестабилизированного течения с переменным по длине расходом  $l_3$ ;
- зона с изменяющийся площадью живого сечения  $l_4$ ;

Зона  $l_1$  - канал, по которому материал поступает в распределительную часть машины, расположен непосредственно перед местным сопротивлением, и характер течения в нем технологической среды аналогичен гидродинамическому предначальному участку. Длина предначального участка (зона  $l_1$ ) определяется зависимостью вида:

$$l_1 = K_n K_0 Re D_{np}, \tag{7}$$

где  $K_0$  - коэффициент сужения канала.

Перепад давления на данном участке представленный в виде критерия Эйлера, при течения аномально-вязкой среды с индексом течения  $n = 0,85$  вычисляется по формуле:

$$Eu = \left(\frac{1}{Re}\right) [263,50 + 582,32 (Re')^{-0,35}] \tag{8}$$

Зона  $l_2$  - область местного сопротивления - обеспечивает переход технологической среды из входного канала к рабочей части фильеры. Образование застойных зон и вихревых областей, во многом определяют гидродинамические характеристики потока, влияет на процесс тепло- и массообмена, а все эти процессы в значительной степени определяют технологический режим.

Размеры вихревых областей зависят от геометрических параметров местного сопротивления, реологических свойств движущейся жидкости и числа Рейнольдса (рис. 2). В общем случае данная функциональная зависимость имеет следующий вид:

$$l_2 = K_0 Re D_{np}^n, \tag{9}$$

где  $K_0$  - коэффициент учитывающий геометрические параметры местного сопротивления (для данных исследований  $K_0 = 0,33$ ).

Значение коэффициента  $\eta$  (учитывающего реологические свойства среды) приведены в табл. 2.

Таблица 2

Определение коэффициента  $\eta$ , учитывающего реологические свойства водных растворов сред

Исследуемая жидкость	Re	$\eta$
Поливиниловый спирт		
2%-й р-р (псевдопластик)	200-830	0,617
4%-й р-р	3600-800	0,604
Карбоксиметилцеллюлоза		
2%-й р-р (псевдопластик)	210-924	0,645
5%-й р-р	244-900	0,609
8%-й р-р	310-780	0,971

Если технологическая среда обладает вязкоупругими свойствами, то величина  $l_2$  зависит еще от числа Вайссенберга.

В зоне  $l_3$  течение рабочей среды происходит с переменной массой (расходом). Анализ распределения поля скоростей и давлений по длине подобного потока приведены в известных работах Мак-Келвы, Р.В.Торнера и др. Уравнения, описывающие течение с переменной по длине массой получены И.В. Мищерским и Г.А.Петровским [5].

Зона  $l_4$  - плоскощелевой сужающийся канал - является формующей частью машины, последним и наиболее ответственным участком. Как показали производственные испытания, гидродинамические условия входа и характер течения в этой зоне оказывает влияние на качество получаемой целлофановой пленки. На основании аналитических экспериментальных расчетов гидродинамического начального участка были определены взаимосвязи между конструктивными и технологическими параметрами оборудования, установлены оптимальные условия подачи материала в выходной щелевой зазор (перепад давления, значение критического напряжения сдвига  $\tau_{кр}$  и т.д.) Уменьшение потерь давления в зоне  $l_4$  было получено за счет изменения угла  $\alpha$  (рис. 5). Характер изменения давления по длине данного участка приведен на рис.6, характер кривой давления начинает существенно изменяться при значениях угла раскрытия  $\alpha > 45^\circ$ .

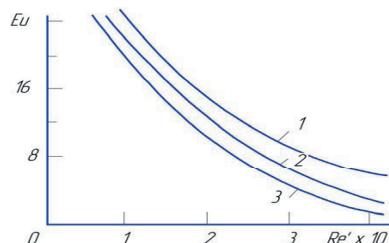


Рис. 6. Зависимость  $Eu = f(Re)$  при течения 3%-го р-ра ПВС в области внезапного сужения канала ( $K_0 = 3$ ) с различными значениями угла входа: 1- острые кромки; 2 - угол входа  $45^\circ$ ; 3 - лемниската

### Выводы

Таким образом, анализ закономерностей течения в рассматриваемых зонах машины с учетом реологиче-

ских свойств среды позволили разработать методику расчета формующей части машины по переработке целлюлозы, усовершенствовать ее конструкцию и повысить эффективность работы технологической линии в целом.

### Литература

1. Идельчик, И.Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов [Текст] / И.Е.Идельчик.-М. : Машиностроение, 1983. -351 с.
2. Каминер,А.А. Гидродинамика в инженерной практике [Текст] / А.А.Каминер, О.М.Яхно. –К. : Техніка,1987. -175с. – Библиогр.: с165-173.
3. Носко, С.В. Критериальная оценка степени действия сил инерции на гидродинамические характеристики потока в каналах литниковой системы [Текст] / С.В.Носко,В.А.Ковалев / Вестник НТУУ» КПИ» : Машиностроение. -2002. –Т.1, №42 –С.192-193.
4. Носко, С.В. Исследование кинематических характеристик потока в каналах литниковой системы, методами визуализации[Текст] / С.В.Носко, В.А.Мосийчук / Вестник НТУУ «КПИ» : Машиностроение. -2011 №62. –с79-82.
5. Петров, Г.А. Движение жидкости с изменением расхода вдоль пути [Текст] / Г.А.Петров. – М.: Стройиздат 1961. – 137с.

УДК 539.3

## УТОЧНЕННАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ПРОГРЕССИРУЮЩЕГО РАЗРУШЕНИЯ

**А. В. Гондляр**

Доктор технических наук, профессор  
Кафедра химического, полимерного и силикатного  
машиностроения  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»  
пр. Победы, 37, г. Киев, 03056  
Контактный тел.: (044) 406-85-46, 067-465-53-27  
E-mail: avg\_ru@mail.ru

*Розглянуто питання побудови уточненої ітераційно-аналітичної моделі деформування багатошарових конструкцій з композитних матеріалів, орієнтованої на дослідження процесів прогресуючого руйнування і розширення. Наведено рішення контрольних завдань*

*Ключові слова: теорії багатошарових систем, композити, руйнування, міцність*

*Рассмотрены вопросы построения уточненной итерационно-аналитической модели деформирования многослойных конструкций из композитных материалов, ориентированной на исследование процессов прогрессирующего разрушения и расслоения. Приведены решения контрольных задач*

*Ключевые слова: теории многослойных систем, композиты, разрушение, прочность*

*The problems of iteratively refined analytical models constructing of multilayer structures deformation of composite materials, process-oriented ob study of the progressive destruction and layering are shown. The solutions of control tasks are given*

*Keywords: multilayer systems theory, composite materials, destruction, strength*

### 1. Введение

Растущие требования к экономичности, надежности и снижению материалоемкости сооружений выдвигают задачу анализа деформирования и разрушения многослойных оболочек в качестве одного из главных направлений механики композитов.

Как известно, большие трудности, возникающие в связи с наличием малого параметра - толщины слоев оболочки при непосредственном интегрировании дифференциальных уравнений механики деформированного твердого тела применительно к исследованию н.д.с. оболочечных систем, приводят к необходимости разработки специальных математических