

УДК 532.543

DOI: 10.15587/2312-8372.2018.128478

## УПРАВЛЕНИЕ ВИХРЕВЫМИ СТРУКТУРАМИ АНОМАЛЬНО-ВЯЗКИХ СРЕД В КАНАЛАХ ФОРМУЮЩЕЙ ГОЛОВКИ ЭКСТРУДЕРА

Носко С. В., Агаев И. А.

*Объектом исследования являются вихревые структуры, возникающие при течении аномально-вязких сред в каналах формующего оборудования. Одним из наиболее проблемных мест является недостаточная изученность процессов зарождения и развития циркуляционных течений. Это связано с тем, что гидродинамические механизмы данных процессов не совсем понятны. Причиной этого является отсутствие точных аналитических решений, позволяющих описать модель процесса и выбрать метод гидродинамического управления вихревыми структурами и на его основе усовершенствовать формующее оборудование.*

*В ходе исследований установлено, что наиболее действенным способом управления гидродинамическими характеристиками потока в области резкого сужения канала является подвод дополнительного расхода жидкости в радиальном направлении по отношению к основному потоку. Разработана конструкция формующей головки, которая позволяет реализовать режим смешения компонентов с улучшенными технологическими и энергетическими показателями. Это связано с тем, что предложенный метод управления вихревыми структурами имеет ряд отличительных особенностей, в частности экструдированная среда проходит через каналы головки в виде внезапного сужения, а затем по ходу течения, конусного расширения. Технологический компонент, подлежащий смешению, подается радиально в область вихревых структур с зоной пониженного давления. Благодаря этому обеспечивается возможность срыва вихревых структур, турбулизация течения и интенсивное смешение основного и дополнительного потоков. По сравнению с аналогичным известным оборудованием в каналах головки не предусмотрено расположение смесительных устройств и стационарных турбулизаторов, что снижает энергозатраты на процесс экструзии. Кроме того, предоставляется возможность для подачи технологического компонента в базовый поток использовать насос меньшей мощности.*

*Разработанное устройство для ввода технологических компонентов в экструдированный материал оформлена патентом Украины № 201503942.*

**Ключевые слова:** *внезапное сужение канала, вихревые структуры, подвод расхода в радиальном направлении.*

### 1. Введение

Ввод технологических компонентов в экструдруемый материал широко применяется при производстве полимерных композиций, коэкструзии пищевых

продуктов, нефтехимической промышленности, а также в других отраслях производства, применяющих экструзию.

Определяющим фактором технологии ввода и смешения компонентов являются процессы, происходящие в формующей головке экструдера. Для реализации данных процессов на практике используются формующие головки различных типов, характеризующиеся множеством конфигураций рабочих каналов [1].

Симметрично сужающиеся и расширяющиеся каналы являются распространенными элементами формирующих головок. При этом геометрическая простота каналов не приводит к симметричным течениям, более того, течение жидкости характеризуется такими эффектами, как вторичные циркуляционные структуры и сжатие потока в узкой части канала.

Вместе с тем, реализация технологий смешения существенно ограничивается из-за отсутствия эффективного и одновременно простого по конструктивному исполнению оборудования, осуществляющего смешение компонентов в жидкой фазе с возможностью оперативного управления процессом.

Различные способы экструзионного смешения технологических компонентов на реальных объектах недостаточно эффективны, так как имеют узкую специализацию и не учитывают гидродинамические особенности взаимодействия экструдированного потока с вводимым рецептурным компонентом. Кроме того, при разработке оборудования часто не учитывается влияние конструктивных параметров каналов формующих головок на величину полезной мощности при заданной производительности экструдера. При этом в большинстве случаев проектирования, задача оптимизации данных технологических процессов сводится к устранению застойных зон в каналах формующего оборудования.

В связи с этим актуальными являются исследования, посвященные поиску путей усовершенствования технологических процессов смешения компонентов в экструдированный материал. При разработке соответствующих технологических решений необходимо учитывать особенности реологического и гидродинамического поведения сред смешения в каналах оборудования.

## **2. Объект исследования и его технологический аудит**

*Объектом исследования* являются вихревые структуры, возникающие при течении аномально-вязких сред в каналах формующего оборудования. Одним из наиболее проблемных мест является недостаточная изученность процессов зарождения и развития циркуляционных течений. Это связано с тем, что гидродинамические механизмы данных процессов не совсем понятны. Причиной этого является отсутствие точных аналитических решений, позволяющих описать модель процесса и выбрать метод гидродинамического управления вихревыми структурами и на его основе усовершенствовать формующее оборудование.

Для выявления особенностей методов управления, проводился технологический аудит, имеющий целью определить гидродинамические

условия срыва вихревых структур при подводе дополнительного расхода в область внезапного сужения канала.

Исследования проводились на экспериментальном стенде замкнутого типа, каналы которого изготавливались из оргстекла (полиметилметокристалла), обладающего необходимыми оптическими свойствами. Это давало возможность изучить кинематические характеристики потока методом оптической визуализации. Расход жидкости плавно регулировался насосом путем изменения числа оборотов электродвигателя постоянного тока. Это позволяло проводить исследования в широком диапазоне чисел Рейнольдса (10–10000) с разнообразными, по своим физико-химическим свойствам, средами. Расход жидкости измерялся расходомерным устройством объемного типа.

Наблюдение за объектом в течение эксперимента позволяет констатировать следующее. Метод управления вихревыми структурами целесообразно использовать для турбулизации течения при определенном соотношении основного и дополнительного потоков. При этом наиболее важным следует считать необходимость контроля эффективной вязкости среды, геометрических параметров внезапного сужения канала и числа Рейнольдса. Это позволит в практических условиях повысить эффективность процесса смешения компонентов и уменьшить энергозатраты, связанные с экструзионной технологией.

### **3. Цель и задачи исследований**

*Цель исследований* – разработка гидродинамических методов управления вихревыми структурами в каналах формующего оборудования, приводящих к турбулентному смешению потоков.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Определить влияние реологических свойств жидкости на процессы вихреобразования потока в области внезапного сужения канала.
2. Установить значение дополнительного расхода, вводимого в радиальном направлении относительно основного потока, при котором происходит срыв вихревых структур.
3. Разработать конструктивное решение формующей головки, обеспечивающей рациональный режим смешения технологических компонентов.

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

Из современных работ, анализирующих неустойчивое течение неньютоновских сред с образованием застойных зон в угловых областях формующих головок, следует отметить следующие исследования.

В работах [2–6] исследовалось изотермическое течение вязкоупругой жидкости в каналах с резким симметричным сужением. Авторами, с использованием релаксационной модели Максвелла методом контрольных объемов, установлено, что существует зависимость безразмерной области циркуляционного течения от числа Деборы. Показано также, что схема течения

с плавным переходом из широкой части канала в узкую приводит к уменьшению размеров области циркуляционного течения. Однако следует отметить, что в данных работах не представлено влияние температуры среды на процессы развития циркуляционных течений. Это означает, что не определено, как проходят процессы вихреобразования в области внезапного сужения канала при условии изменения температуры. С практической точки зрения это может вызвать затруднения при расчетах гидродинамических параметров формирующего оборудования.

Для устранения этой проблемы в работах [6–9] проведены исследования осесимметричного неизотермического установившегося и нестационарного течения с коэффициентом сужения 8:1. Показана динамика поведения циркуляционной зоны и ее взаимодействие с угловым течением при различных числах Вейссенберга. Установлено, что при поглощении углового циркуляционного течения вблизи острой кромки канала возникают пики напряжений и давления. Несмотря на практическую значимость данных результатов, не рассмотрены вопросы устранения вихревых структур. Очевидно, это связано со сложностью численного моделирования данных процессов с использованием метода контрольных объектов.

Целесообразность использования способов управления процессом возникновения нелинейного эффекта потери симметрии потока приведена в работах [9–13]. Показано сравнение контуров линии тока при течении в области резкого сужения канала для ньютоновской, псевдопластичной и дилатантной жидкостей соответственно. Исследованиями установлены значения чисел Рейнольдса для каждой из модельных жидкостей, при которых возникает переход от симметричной формы течения к несимметричной. Однако следует отметить, что введение дополнительных элементов (блоков) на стенках или оси канала, с целью устранения несимметрии потока, не нашла практического применения. Это связано с тем, что установка в поток неньютоновских сред стационарных элементов приводит к увеличению потерь давления по длине канала.

В работе [14] проведены аналитические и экспериментальные исследования нестабилизированного течения при радиальном подводе дополнительного расхода жидкости в область местного сопротивления. Показано, что изменения условий входа жидкости в узкую часть канала влияют на структуру потока и перераспределение давления по длине гидродинамического начального участка. Однако не рассмотрены в достаточной мере гидродинамические задачи, связанные со срывом вихревых структур в области внезапного сужения канала.

Таким образом, есть основания утверждать, что вихревые застойные зоны являются негативным явлением для процессов экструзии. Циркуляционные потоки приводят к пикам напряжений, пульсациям давлений в потоке, нарушению процессов тепло и массообмена, и как следствие, к ухудшению качества получаемых изделий. В вышеприведенных работах рассмотрены возможности управления вихревыми структурами путем сглаживания (профилирования) входного участка канала либо размещением стационарных

стабилизаторов в потоке. Первый вариант управления требуют дополнительных расчетов по определению формы профиля для каждой номенклатуры перерабатываемого материала. Это усложняет инженерные решения по проектированию оборудования. В другом варианте приводит к дополнительным потерям давления в каналах формирующих головок.

В связи с этим есть основания считать, что недостаточное изучение гидродинамических задач управления циркуляционными течениями аномально-вязких сред в области внезапного сужения канала предопределяет необходимость проведения исследований в данном направлении.

## **5. Методы исследования**

### **5.1. Исследуемые материалы и оборудование, используемые в эксперименте**

Исследования проводились с использованием модульных жидкостей различных концентраций – водных растворов натриевой соли карбоксиметрилцеллюлозы (Na КМЦ) марки 70/300 (ТУ 2231-037-26289127) и поливинилового спирта (ПВС) марки 7/2 (ГОСТ 10779-89).

Реологические исследования водных растворов полимеров выполнялись на измерительном комплексе «Rheotest-2» с коаксиальными цилиндрами (производство ГДР).

Для возможности изучения кинематических характеристик потока методом оптической визуализации каналы экспериментального стенда изготавливались из оргстекла (полиметилметокристалла), обладающего необходимыми оптическими свойствами.

### **5.2. Методика определения реологических свойств модельных жидкостей и кинематических характеристик потока**

Оценка влияния концентрации водных растворов полимеров на реологические параметры осуществлялась по результатам измерения при увеличении и уменьшении скорости сдвига ( $\dot{\gamma}_0, \text{c}^{-1}$ ). Определение реологических свойств модельных жидкостей проводилась на образцах КМЦ и ПВС при концентрациях растворов от 2 % до 10 % (по сухому веществу). Диапазон температур составлял 20, 40, 60, 80, 100 °С при градиентах скорости сдвига установившегося течения 1.5–1310  $\text{c}^{-1}$ .

Основными показателями реологических свойств, которые определялись в эксперименте, были выбраны:

- эффективная вязкость ( $\mu$ );
- индекс течения ( $n$ );
- константа консистенции ( $K$ ).

Определение систематической погрешности вискозиметра осуществлялось по следующей методике: проводились вискозиметрические измерения эталонной жидкости (технического глицерина), вязкость которой известна и не зависит от скорости сдвига.

Определение вязкости модельных сред осуществлялось по следующей методике: после выдержки порции жидкости в рабочих элементах

вискозиметра (цилиндр – цилиндр) в течении 20 минут и стабилизации температуры в интервале  $\pm 0,5$  °С. Далее проводились измерения в режиме равномерного увеличения и уменьшения скорости сдвига. Полученные результаты измерений корректировались с помощью поправочных коэффициентов, найденных при исследовании эталонной жидкости для соответствующих значений скорости сдвига.

Определение кинематических характеристик течения в области внезапного сужения осуществлялось по следующей методике: применен метод визуализации, заключающийся в фотографировании введенных в поток и освещенных источником света частиц – меток. В качестве визуализирующих частиц использовался алюминиевый порошок, предварительно обезжиренный и разделенный на фракции по гидравлической крупности. Данный метод обеспечивает требуемую точность измерений (порядка 12–15 %), обладает широкой информативностью и универсальностью [15].

## 5. Результаты исследований

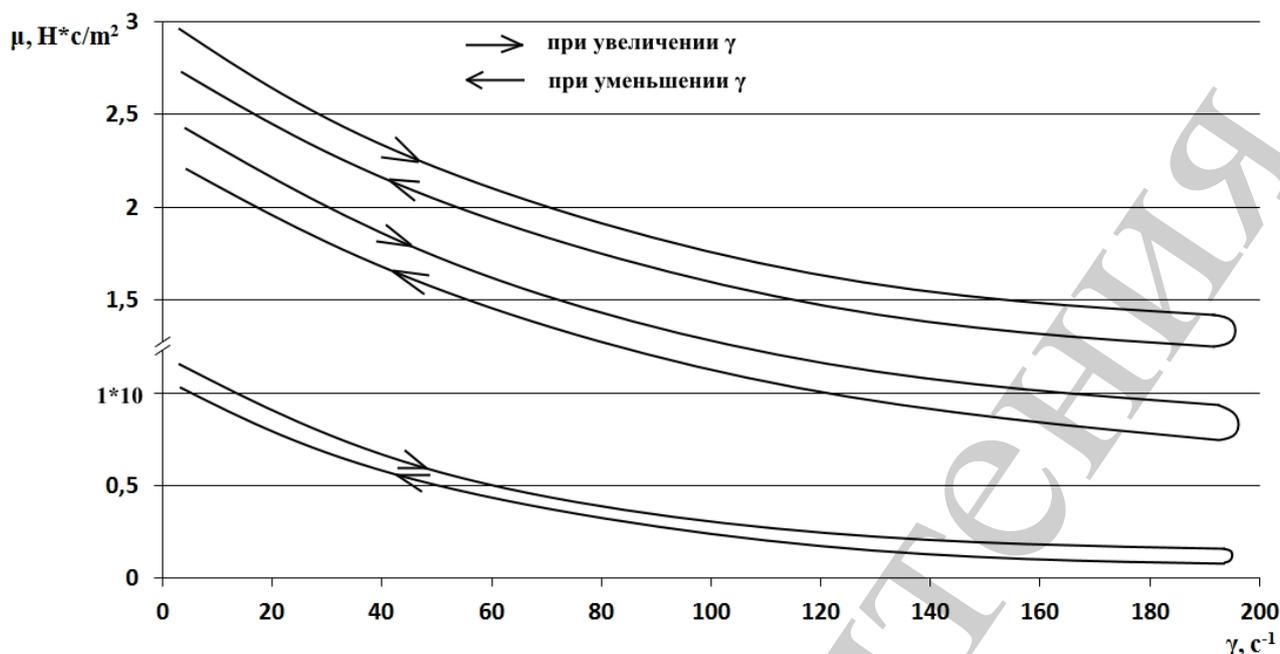
Как показали опытные данные, реологическая модель течения исследуемых сред может быть охарактеризована степенным уравнением Освальда-де Виля:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n, \quad (1)$$

где  $\tau$  – напряжение сдвига, Н/м<sup>2</sup>;  $\dot{\gamma}$  – скорость сдвига, с<sup>-1</sup>;  $K$  – константа консистенции, МПа·с;  $n$  – индекс течения.

Необходимо отметить, что по углу наклона кривой течения, в диапазоне трех десятичных порядков изменения скорости сдвига (в логарифмических координатах) определялся индекс течения  $n$ , а  $\lg K$  – есть отрезок, образованный пересечением кривой течения с осью  $\lg \tau$ .

Экспериментально полученные точки, а также аппроксимирующие их реологических кривые исследуемых концентраций модельных сред при увеличении, и соответственно, уменьшении скорости сдвига, приведены на рис. 1.



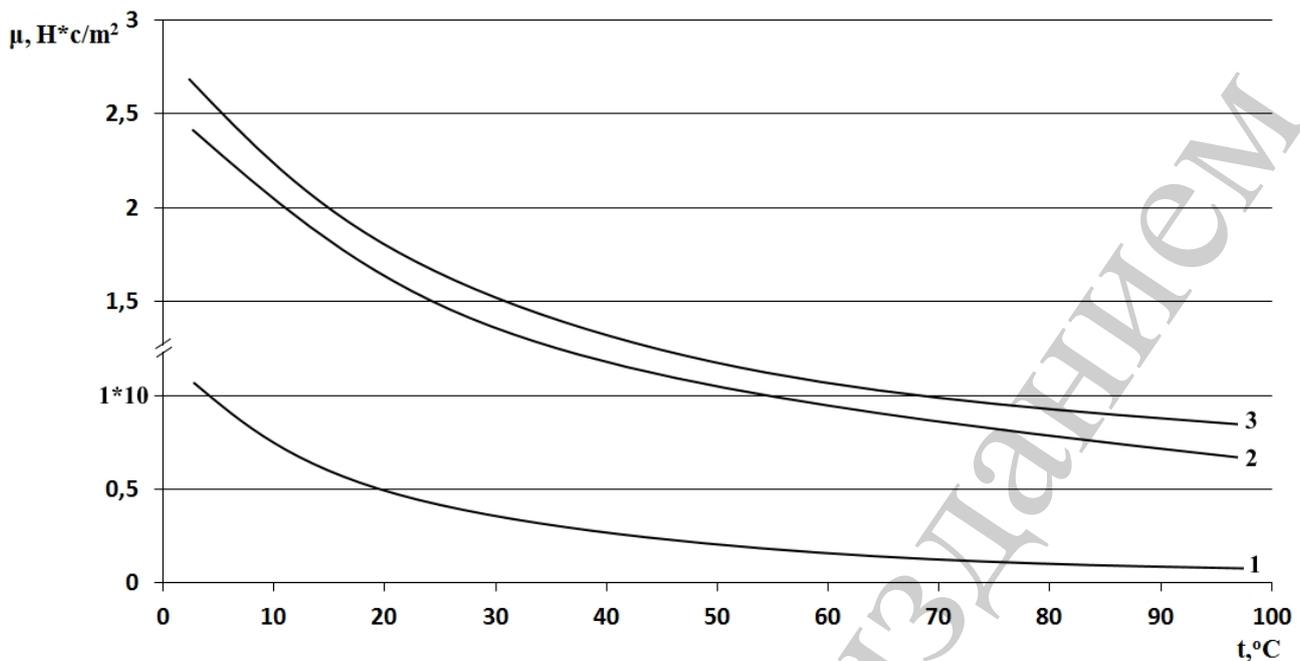
**Рис. 1.** Зависимость вязкости растворов КМЦ и ПВС от скорости сдвига:  
 1 - концентрация 3 % КМЦ; 2 - концентрация 8 % КМЦ; 3 - концентрация 10 %  
 ПВС

Следует отметить, что исследуемые растворы ведут себя как псевдопластические структуры, вязкость которых снижается при возрастании скорости сдвига (рис. 1, кривые 1, 2, 3).

Как можно видеть из рис. 1, кривые течения при плавном увеличении скорости сдвига (верхние кривые) и уменьшении скорости сдвига (нижние кривые) для малой концентрации КМЦ практически совпадают (кривые 1). С увеличением концентрации растворов КМЦ и ПВС кривые течения (кривые 2, 3) образуют петли гистерезиса, то есть среда проявляет свойства тиксотропии. Происходит разрушение структуры среды при деформировании с постоянной скоростью сдвига, что приводит к снижению эффективной вязкости.

Следует отметить, что согласно активационной теории течения [16], количественной характеристикой явления тиксотропии может служить площадь петли гистерезиса, образованная кривыми течения.

Результаты зависимости значений эффективной вязкости растворов КМЦ и ПВС от температуры представлены на рис. 2.



**Рис. 2.** Зависимость вязкости от температуры:  
1 – 3 % КМЦ; 2 – 8 % КМЦ; 3 – 10 % ПВС

Необходимо обратить внимание на то, что в интервале температур 20–100 °С эффективная вязкость исследуемых сред (рис. 2, кривые 1, 2, 3) снижается по зависимости, близкой к экспоненциальной.

Полученные результаты об изменениях напряжения сдвига растворов  $\tau$  в широком диапазоне скоростей сдвига  $\dot{\gamma}$ , характерных для процессов экструзии, могут способствовать выбору и расчету технологических параметров формирующего оборудования. В частности, рассчитать скорость сдвига среды в цилиндрической части формирующей головки и перепад давления  $nP$ , затрачиваемый на течение материала в изотермических условиях [17]:

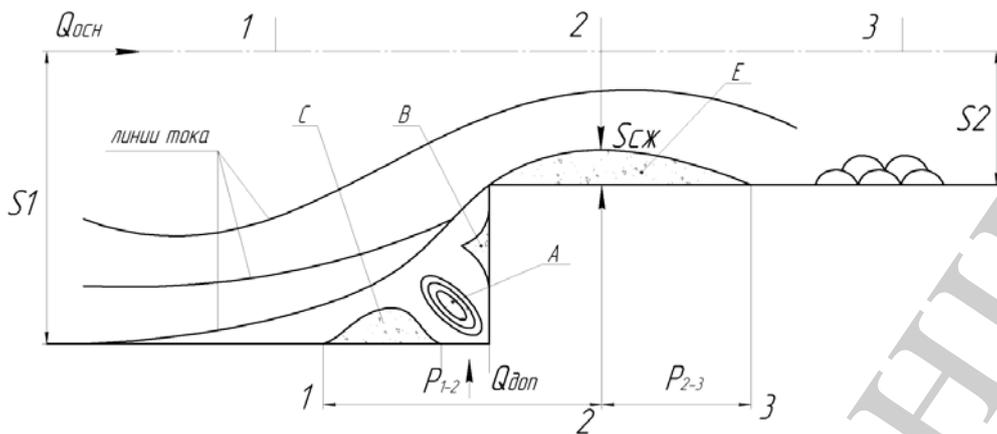
$$\dot{\gamma} = \frac{(3n + 1)Q}{\pi n r^3}, \quad (2)$$

где  $Q$  – объемный расход;  $r$  – радиус канала;

$$nP = \frac{2\tau L}{r} = \frac{2\mu \cdot \dot{\gamma} L}{r}, \quad (3)$$

где  $L$  – длина канала.

Результаты исследований кинематических характеристик течения в области внезапного сужения канала представлены на рис. 3.



**Рис. 3.** Модель течения в области внезапного сужения плоскощелевого канала: А – основной вихрь; В, С – застойные зоны; Е – кольцевая изолированная полость

Следует обратить внимание на то, что при течении 3 % водного раствора КМЦ при значении обобщенного числа Рейнольдса  $Re < 90$ , в области внезапного сужения (коэффициент сужения  $K_0 = S_1/S_2 = 3$ ), явно выраженного вихреобразования не наблюдалось. Основной вихрь А образовывается при  $Re > 120$ , а четко выраженная ось вращения вихря возникает при  $Re > 320$  (рис. 3). Далее, по мере увеличения числа Рейнольдса ( $Re > 1300$ ), наблюдается снижение интенсивности вихревой структуры, уменьшение ее размеров и некоторое смещение оси вращения в направлении боковой стенки канала.

Результаты исследований показывают, что при достижении  $Re$  значения 1560–1600, происходит разъединение основного вихря А, некоторый объем жидкости отделяется от вихря и движется вдоль боковой стенки в направлении, противоположном основному потоку. Происходит взаимодействие части вихря с основным потоком и образуется застойная зона С (рис. 3).

Необходимо отметить, что при достижении числа  $Re \geq 1750$  возникают пульсации вихревой зоны относительно продольной и поперечной оси канала и возвратное течение по дну канала. Данная ситуация влияет на перераспределение напряженно деформированного состояния в потоке.

Таким образом, приведенные результаты позволяют сделать вывод о том, что размеры вихревых структур А, В, и С, а также процесс их развития зависит от геометрических параметров местного сопротивления, реологических свойств движущейся жидкости и числа Рейнольдса.

Следует отметить, что в канале меньшей площадью поперечного сечения ( $S_2$ ), наблюдается кольцевая изолированная полость Е (рис. 2). В данной зоне вторичных течений ( $S_{сж}$ ) касательные напряжения на стенке канала имеют одинаковые направления с течением в ядре потока, а градиент скорости по нормали незначителен. При значении  $Re = 1250$  в зоне Е наблюдались две вихревые зоны, взаимодействующие между собой и имеющие S-образную форму.

Потери энергии для исследуемого участка канала можно представить в виде двух составляющих:

$nP_1$  и  $nP_2$ ,

где  $nP_1 = nP_{1-2}$  - обратимые потери энергии, определяемые на участке между сечениями 1–2 (рис. 3), а  $nP_2 = nP_{2-3}$  - необратимые потери энергии, определяемые соответственно на участке 2–3.

Суммарные потери давления на данном участке канала, т. е.  $nP = nP_{1-2} + nP_{2-3}$  определяются из следующего выражения:

$$nP = \rho \frac{Q}{2S_2 K} \left[ \left( \frac{1}{0} - 1 \right) \left( \frac{1}{c} - 1 \right)^2 \right], \quad (4)$$

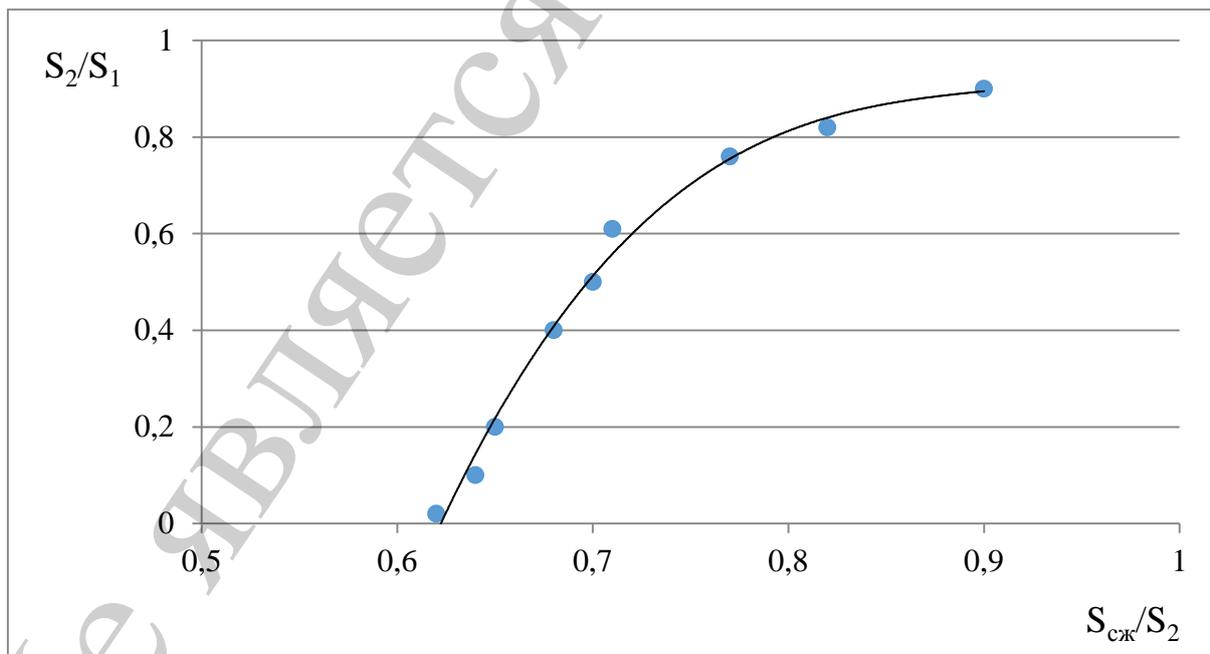
где  $\rho$  - плотность жидкости;  $Q$  - расход жидкости;  $S_{сж}$  - площадь сжатого сечения;

$$K_0 = (S_1 / S_2) > 1, K_c = (S_{сж} / S_2) < 1.$$

В первом приближении зависимость между коэффициентами  $K_0$  и  $K_c$  может быть представлена в виде:

$$K_0 = 2K_c - 1. \quad (5)$$

Как показали экспериментальные исследования, между коэффициентами  $K_0$  и  $K_c$  существует зависимость, которая может быть представлена в виде графика на рис. 4.



**Рис. 4.** Зависимость  $S_2/S_1$  от  $S_{сж}/S_2$  при течении 3 % раствора КМЦ (карбоксиметилцеллюлозы) во внезапном сужении канала

Анализ опытных данных показал, что для 3 % водного раствора КМЦ (индекс течения  $n=0,967$ ) погрешность формулы (4) не превышает 14 %. В случае, если жидкость проявляет аномалии вязкости в большей степени, то выражение (4) нуждается в корректировке.

Зависимость (4) можно представить в следующем виде:

$$Re = \frac{\frac{nPД_{np} \cdot 2}{\mu \cdot Q}}{\left(\frac{1}{K_0^2} - 1\right) - \left(\frac{1}{K_c} - 1\right)^2}, \quad (6)$$

где  $\mu$  - динамическая вязкость жидкости;  $D_{np}$  - приведенный диаметр.

В правой части выражения (6) записана безразмерная величина, пропорциональная потерям энергии в области внезапного сужения и характеризующая степень сжатия потока в канале с меньшей площадью поперечного сечения.

Для ньютоновской жидкости данная величина численно равна критерию Рейнольдса, а для неньютоновской среды она пропорциональна критерию  $Re$  с коэффициентом пропорциональности  $K_c$ .

Таким образом, по аналогии с определением физического смысла числа Рейнольдса можно сделать вывод, что полученный выше параметр также характеризует отношение сил инерции в потоке движущейся среды к силам вязкого трения, но только на исследуемом участке. По существу, полученный безразмерный параметр (6) является критерием Лагранжа, откорректированным для области сжатого потока (рис. 4).

Учитывая, что  $nP$  определяется как сумма  $nP_1 + P_2$ , то для определения потерь энергии в области внезапного сужения канала должна быть справедлива зависимость вида:

$$Re = \frac{\frac{La_n}{\left(\frac{1}{K_0^2} - 1\right) - \left(\frac{1}{K_c} - 1\right)^2} + \frac{La_0}{\left(\frac{1}{K_0^2} - 1\right) - \left(\frac{1}{K_c} - 1\right)^2}}{\left(\frac{1}{K_0^2} - 1\right) - \left(\frac{1}{K_c} - 1\right)^2}, \quad (7)$$

где  $La_n$  - критерий Лагранжа, соответствующий необратимым потерям энергии;

$La_0$  - критерий Лагранжа, соответствующий обратимым потерям энергии.

Следует отметить, что одним из наиболее действенных способов управления гидродинамическими характеристиками потока в области внезапного сужения канала, является подвод дополнительного расхода жидкости  $Q_{дон}$  в радиальном направлении по отношению к основному потоку (рис. 3). При этом предоставляется возможность в значительной степени изменять расположение и размеры вихревых структур А, В, С.

Подвод  $Q_{дон.}$  приводит также к перераспределению энергии потока в изолированной вихревой полости Е (рис. 3), при котором часть энергии полости передается обратно основному потоку. При отношении  $\frac{Q_{дон.}}{Q_{осн.}} = 0,16 - 0,24$  в прямоугольном канале за внезапным сужением  $\left(\frac{S_1}{S_2} = 2\right)$  характер пьезометрической линии изменяется таким образом, что ее экстремум, связанный с давлением в зоне Е, исчезает.

При отношении  $\frac{Q_{дон.}}{Q_{осн.}} \approx 0,3$ , в области чисел Рейнольдса ( $Re \geq 10^3$ ), происходит срыв вихревых структур и интенсивная турбулизация потока по длине гидродинамического начального участка, расположенного за внезапным сужением канала.

Установлено, что зависимость (1) имеет степенной характер, что подтверждается коэффициентом корреляции 0,9956.

При определении зависимости вязкости растворов КМЦ и ПВС от скорости сдвига, как это видно из полученных результатов (рис. 1), закономерным является уменьшение значения вязкости с увеличением скорости сдвига и проявление явления тиксотропии [16]. Это обусловлено тем, что исследуемые структуры при деформировании с постоянной скоростью сдвига постепенно разрушаются и это приводит к снижению эффективной вязкости. Следует отметить, что при снятии деформации структура среды постепенно восстанавливается. При этом увеличение концентрации растворов количественно изменяет данное явление, т. е. происходит увеличение площади петли гистерезиса, которая образуется кривыми течения (рис. 1).

Анализ кривых течения при повышении температуры (рис. 2) вызывает снижение напряжения сдвига и вязкости растворов. Оценка приведенных данных открывает возможность для получения рациональных режимов смешения компонентов в каналах формующей головки при экструзии.

Картина течения в области внезапного сужения канала (рис. 3) показывает механизм образования и развития вихревых структур.

Следует отметить, что используемый метод визуализации течения имеет слабые стороны, связанные с невозможностью определения напряженно-деформационного состояния потока среды. Вместе с тем, данный метод дает достаточно точную информацию об эволюции вихревых структур в области внезапного сужения канала.

В пользу этого утверждения свидетельствует качественное совпадение процессов развития циркуляционных течений, полученных численным моделированием течения вязкоупругих сред в плоских ступенчатых симметричных каналах [2–5]. Количественное расхождение результатов можно объяснить выбором в вышеприведенных работах реологической модели Oldroyd–В, характеризующей упругие свойства жидкости (конечное время релаксации).

Следует отметить, что и для моделей Oldroyd-B и БЕКЕ-Р в плоских каналах со ступенчатой конфигурацией с коэффициентами сужения 8:1, 16:1 при различных числах Вайссенберга эффект образования, развития и исчезновения вихревых структур также проявляется. Но это происходит при других значениях упругости среды [6–12].

Анализируя способ срыва вихревых зон от стенок внезапного сужения при радиальном подводе расхода (рис. 3), можно констатировать, что при отношении  $\frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}} \approx 0,3$  обеспечивается отрывное течение с резким изменением параметров потока, характеризующееся турбулентным смещением.

## 7. SWOT-анализ результатов исследований

*Strengths.* Среди сильных сторон данного исследования необходимо отметить полученные результаты по управлению вихревыми структурами в каналах формующего оборудования, которые позволили разработать конструкцию устройства для введения компонентов в экструдированный материал и снизить энергозатраты на проведение технологического процесса. В пользу этого утверждения свидетельствуют приведенные выше результаты анализа научной периодики и патентной информации, в которых такие данные отсутствуют. Именно по этой причине в практических условиях эксплуатации смесительного оборудования трудно выбрать приоритетные мероприятия по усовершенствованию устройств ввода компонентов в экструдированный материал. Использование же полученных данных относительно гидродинамического управления вихревыми структурами для турбулизации потока позволяет решить задачу выбора рациональных технологических режимов смещения компонентов. Критериями для выбора при этом являются, с одной стороны, расширенный диапазон практического применения и производительность оборудования, а с другой – минимизация затрат на сам процесс модернизации. Последняя может быть обусловлена обоснованным выбором конструктивных решений формующих головок по критерию «цена-качество», либо по критерию надежности.

*Weaknesses.* Слабые стороны данного исследования связаны с тем обстоятельством, что предложенные решения основаны на предположении о изотермичности течения сред в каналах формовочного оборудования. Вместе с тем, хорошо известно, что такое допущение для реальных процессов экструзии оказывается некорректным. Причиной этого являются температурный фактор, влияющий на процесс, например, температурная зависимость вязкости компонентов, образование радиальной температурной неоднородности среды в области застойных зон потока и ряд других отрицательных эффектов. В результате этого, данные исследований, которые используются при разработке оборудования могут привести к падению эксплуатационных показателей и, в некоторых случаях, к ухудшению качества продукции. Поэтому для предотвращения указанного недостатка, связанного со сложностью проведения неизотермического эксперимента, следует особое внимание уделять

результатам математического моделирования процессов экструзионного смешения. Иными словами, экспериментальные результаты дополняют информацию соответствующую практическим требованиям проектирования формующих головок, несмотря на то, что приоритетным направлением модернизации оборудования являются простые математические методы.

*Opportunities.* Дополнительные возможности кроются в следующих вероятных внешних факторах. Рассматриваемый технологический объект может эксплуатироваться в Украине и бывших республиках Советского Союза. Все объекты с подобным функциональным назначением сегодня могут считаться как физически, так и технологически устаревшими. Данное обстоятельство может считаться стимулирующим в том смысле, что среди перечня смесительного оборудования может быть выбрано разработанное устройство, которое позволит с учетом приведенных результатов исследований обеспечить приемлемое качество процессов смешения компонентов. Именно таким образом задача устранения фактора морального износа может быть решена в условиях конкретного производства. При этом полученные в результате внедрения результаты могут стать основой для дальнейшего развития описываемого исследования. В частности, может быть исследовано влияние упруговязких свойств компонентов смешения на технологический процесс. Это позволит внести соответствующие изменения в методику расчета и проектирования оборудования.

*Threats.* Сложность во внедрении полученных результатов исследования с двумя основными факторами.

Первый из них – менеджмент компаний, эксплуатирующий рассматриваемое оборудование. Вложение дополнительных средств в приобретение необходимого оборудования и отсутствие заранее гарантированного высокого результата является сдерживающим фактором для руководства компаний. Неправильно подобранная конструкция формующей головки, предназначенной для смешения технологических компонентов, без учета специфических для данных условий эксплуатации факторов может вообще не обеспечить прогнозируемый результат. Данный риск имеет под собой все основания, так как описанные в работе результаты получены для изотермического процесса течения аномальновязких сред в каналах формующего оборудования.

Второй фактор – рынок современного экструзионного оборудования, предлагаемого от мировых компаний-лидеров, перенасыщен и предполагает значительную конкуренцию.

Таким образом, SWOT-анализ результатов исследований позволяет обозначить основные направления для успешного достижения цели исследований. Среди них: разработка математических методов моделирования неизотермического течения аномальновязких сред в каналах смесительного оборудования.

## 8. Выводы

1. Установлено влияние реологических свойств жидкости на процессы вихреобразования потока в области внезапного сужения канала. Показано, что проявления аномалии вязкости сред существенно влияет на величину тиксотропных связей, а также на процессы возникновения и развития вихревых структур. При уменьшении индекса течения в степенном реологическом уравнении от 0,967 до 0,652 размеры основного вихря  $A$  уменьшаются на 38–40 %. Определение более точной зависимости затруднительно, так как связано с необходимостью проведения дополнительных дорогостоящих исследований.

2. Показано, что при отношении  $\frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}} = 0,16 - 0,24$  в прямоугольном канале за внезапным сужением  $\left(\frac{S_1}{S_2} = 2\right)$  характер пьезометрической линии изменяется таким образом, что ее экстремум, связанный с давлением в зоне  $E$ , исчезает.

Установлено, что при отношении  $\frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}} \approx 0,3$ , в области чисел Рейнольдса  $(Re \geq 10^3)$ , происходит срыв вихревых структур и интенсивная турбулизация потока по длине гидродинамического начального участка, расположенного за внезапным сужением канала. Это свидетельствует о возможности практического использования данного способа управления вихревыми структурами в каналах формирующих головок экструзионного оборудования. При этом получение более точного результата не гарантировано в силу неточности средств измерения, используемых в эксперименте.

3. Установлено, что результаты исследований свидетельствуют о возможности практического использования данного способа управления вихревыми структурами в каналах формирующих головок экструзионного оборудования. Доказательством этого можно считать разработанное устройство для введения технологических компонентов в экструдированный материал, защищенное патентом Украины № 201503942 [18].

## References

1. Torner R. V. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov. Moscow: Khimiya, 1977. 462 p.
2. Bezvikhrevoe techenie vyazkouprugoy zhidkosti vo vkhodnom kanale ekstruzionnoy golovki / Kutuzov A. G. et al. // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. 2012. Vol. 15, No. 21. P. 137–139.
3. Clemeur N., Rutgers R. P. G., Debbaut B. Numerical simulation of abrupt contraction flows using the Double Convected Pom–Pom model // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 2004. Vol. 117, No. 2–3. P. 193–209. doi:[10.1016/j.jnnfm.2004.02.001](https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.02.001)
4. Boger D. V., Hur D. U., Binnington R. J. Further observations of elastic effects in tubular entry flows // Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics. 1986. Vol. 20. P. 31–49. doi:[10.1016/0377-0257\(86\)80014-3](https://doi.org/10.1016/0377-0257(86)80014-3)

5. Verbeeten W. M. H., Peters G. W. M., Baaijens F. P. T. Differential constitutive equations for polymer melts: The extended Pom–Pom model // *Journal of Rheology*. 2001. Vol. 45, No. 4. P. 823–843. doi:[10.1122/1.1380426](https://doi.org/10.1122/1.1380426)
6. Three-dimensional velocity measurements in annular diffuser segments including the effects of upstream strut wakes / Cherry E. M. et al. // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2010. Vol. 31, No. 4. P. 569–575. doi:[10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.029](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.02.029)
7. Kutuzova E. R., Tazyukov F. Kh., Khalaf Kh. A. Dinamika techeniya vyazkoupругoy zhidkosti cherez ploskoe 8:1 suzhenie // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17, No. 16. P. 83–85.
8. Mackley M., Rutgers R. P., Gilbert D. Surface instabilities during the extrusion of linear low density polyethylene // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 1998. Vol. 76, No. 1–3. P. 281–297. doi:[10.1016/s0377-0257\(97\)00122-5](https://doi.org/10.1016/s0377-0257(97)00122-5)
9. Miller E., Rothstein J. P. Control of the sharkskin instability in the extrusion of polymer melts using induced temperature gradients // *Rheologica Acta*. 2004. Vol. 44, No. 2. P. 160–173. doi:[10.1007/s00397-004-0393-4](https://doi.org/10.1007/s00397-004-0393-4)
10. Tazyukov F. Kh., Kutuzova E. R., Snegirev B. A. Potoki vyazkoupругikh zhidkostey modeley OLDROYD-B i FENE-P // *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. Vol. 17, No. 18. P. 120–122.
11. Tazyukov F. Kh., Khalaf H. A. Numerical simulation of the laminar flow of non-Newtonian fluid through a disk-type prosthetic heart valve: proceedings // *Diyala Journal of Engineering Sciences*. 2010. P. 26–39.
12. Tatamikov A. A., Burtelov L. V. Generalised mathematical model of the throughput of the pressure zone of an extruder // *International Polymer Science and Technology*. 2004. Vol. 31, No. 12. P. 72–75.
13. Arda D. R., Mackley M. R. The effect of die exit curvature, die surface roughness and a fluoropolymer additive on sharkskin extrusion instabilities in polyethylene processing // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*. 2005. Vol. 126, No. 1. P. 47–61. doi:[10.1016/j.jnnfm.2004.12.005](https://doi.org/10.1016/j.jnnfm.2004.12.005)
14. Nosko S. V., Shevchuk A. A. The structure of flow in the complex duct in a radial admission of escapages // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2013. Vol. 2, No. 7 (62). P. 57–60. URL: <http://journals.urau.ua/eejet/article/view/12390>
15. Nosko S. V., Mossiychuk V. A. Issledovanie kinematicheskikh kharakteristik potoka v kanalakh litnikovoy sistemy metodami vizualizatsii // *Vestnik NTUU «KPI». Mashinostroenie*. 2011. Vol. 62. P. 79–82.
16. Tager A. A., Botvinnik G. O., Dreval V. E. Energiya i entropiya aktivatsii vyazkogo techeniya kontsentrirovannykh rastvorov polimerov. Moscow: Khimiya, 1970. 296 p.
17. Mikaeli V. Ekstruzionnye golovki dlya plastmass i reziny. Konstruktsii i tekhnicheskie raschety. Saint Petersburg: Profesiya, 2007. 472 p.
18. Formuiuchy prystrii dlia vvodu tekhnolohichnykh komponentiv v yekstrudovanyi material: Patent No. 102591 UA, MPK V29S47 / Nosko S. V., Shevchuk A. A. Appl. No. 201503942. Filed: 24.04.2015. Published: 10.11.2015. Bull. No. 21, 3 p.