

- [Текст] / Л. А. Игумнов, И. П. Марков, В. П. Пазин // Вестник Нижегородского университета им. Н. И. Лобачевского. – 2013. – Вып. 1(3). – С. 115–119.
8. Igumnov L. A. Using the Boundary-Element Method for Analyzing 3-D Problems of Equilibrium of Anisotropic Elasticity with Conjugated Fields [Text] / L. A. Igumnov, I. P. Markov, A. A. Ipatov, S. Yu. Litvinchuk // 2014 International Symposium on Physics and Mechanics of New Materials and Underwater Applications (PHENMA 2014): Abstracts & schedule. Khon Kaen, Thailand, 2014. – P. 38–39
9. Миняйло, Т. А. Усовершенствованный метод последовательных перемещений для расчета пространственных стержневых конструкций [Текст] / Т. А. Миняйло, Д. Н. Колесник, О. Д. Шамровський // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2013. – № 1. – С. 100–105.
10. Колесник, Д. Н. Роль нелинейных эффектов при решении одной плоской задачи теории упругости [Текст] / Д. Н. Колесник, А. Д. Шамровський // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 5, №7 (53). – С. 59–62.

УДК 004.89

## ДЕСТАБИЛИЗАЦИЯ ПОТОКА В КАНАЛЕ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ПО ДЛИНЕ РАСХОДОМ

**О. М. Яхно**

Доктор технических наук, профессор\*

E-mail: o.yahno@kpi.ua

**Н. В. Семинская**

Кандидат технических наук\*

E-mail: seminska@ukr.net

**Д. В. Колесников**

Старший преподаватель

Кафедра автоматических систем  
безопасности и электроустановок\*\*

E-mail: dekol@bigmir.net

**С. В. Стась**

Кандидат технических наук, доцент,

заведующий кафедрой

Кафедра техники\*\*

E-mail: stas\_serhiy@yahoo.com

\*Кафедра прикладной

гидроаэромеханики и мехатроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, 03056

\*\*Черкасский институт пожарной

безопасности им. Героев Чернобыля

ул. Оноприенко, 8, г. Черкассы, Украина, 18034

*У роботі на підставі експериментальних досліджень проведено порівняння гідравлічних характеристик потоків в'язких і аномально – в'язких рідин в гідравлічних системах з криволінійним трубопроводом і транзитним витратом з подібними результатами за умови постійності витрати. Показано відмінність у визначенні гідравлічних втрат і дані рекомендації для розрахунку перепаду тиску в каналах з дискретним відбором рідини по довжині*

*Ключові слова: дискретний відбір, дестабілізація, кривизна каналу, транзитні витрати, фіктивна довжина*

*В работе на основании экспериментальных исследований проведено сопоставление гидравлических характеристик потоков вязких и аномально – вязких жидкостей в гидравлических системах с криволинейным трубопроводом и транзитным расходом с подобными результатами при условии постоянства расхода. Показано различие в определении гидравлических потерь и даны рекомендации для расчета перепада давления в каналах с дискретным отбором жидкости по длине*

*Ключевые слова: дискретный отбор, дестабилизация, кривизна канала, транзитный расход, фиктивная длина*

### 1. Введение

Течение вязких и аномально-вязких жидкостей в каналах с изменяющимся по длине расходом обладает целым рядом особенностей. Такое течение, как правило, является нестабилизированным, уровень дестабилизации связан не только с отбором по длине канала жидкости, но и целым рядом других факторов, одним

из которых являются реологические свойства среды. В качестве примера рассмотрим пенообразующие присадки, используемые в пожарном деле, которые в ряде случаев являются неньютоновскими жидкостями. Из этого следует, что с изменением по длине расхода  $Q$ ,

может изменяться градиент скорости  $\gamma = \frac{4Q}{\pi R^2}$ , а, сле-

довательно, и динамическая вязкость  $\mu$ , что приведёт к дополнительному фактору дестабилизации.

Другим фактором может быть кривизна  $\frac{1}{R}$  трубопровода, способствующая перераспределению скоростей по его длине.

Важное значение оказывает температурный фактор. Нестабилизированные процессы водопроводных систем, орошения, систем, используемых в пожарной технике, как правило определяют их работу и надежность в условиях эксплуатации. Однако такие процессы могут быть причиной дестабилизации работы оборудования и поэтому проблема обоснования расчетных параметров системы, которые обеспечивают надежность работы, актуальна. К нестабилизированным процессам движения жидкости в пожарной технике относят процессы в различных типах распределительных и оросительных напорных трубопроводах, где движение жидкости происходит с переменной по длине массой. Одним из требований к этим системам является требование равномерности орошения поверхностей с одинаковыми затратами жидкости на единицу поверхности с учетом требований относительно энергосбережения. В связи с этим, одной из первоочередных задач в этом направлении, является задача прогнозирования работы подобной оросительной системы при заданных ее геометрических характеристиках, кинематических и динамических характеристиках потока.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Исследованием течения вязких и аномально-вязких жидкостей в различного рода распределительных и оросительных системах занимался целый ряд исследователей [1–10]. Особенностью решаемой проблемы являлось то, что масса жидкости по длине трубопровода изменялась за счет отбора (или добавки). В основном рассматривались потоки ньютоновской жидкости при ламинарном режиме течения [4] с непрерывным отбором жидкости через боковые стенки. В таком случае может быть использовано уравнение Мещерского [11] позволяющие определить перепад давления при заданном законе изменения расхода по длине.

$$\frac{d(\alpha_0 Q^2)}{2gS^2} + \frac{dp}{\rho g} + dz + Idx + \frac{\alpha_0 \mu}{g} \left( \frac{\mu}{\rho} \frac{u'}{u} \right) \frac{dQ}{Q} = 0,$$

где  $Q$  – расход,  $u_{cp}$  – средняя скорость,  $z$  и  $p$  – соответственно продольная координата и гидродинамическое давление,  $S$  – площадь поперечного сечения канала,  $I$  – гидравлический уклон,  $\alpha_0$  – коэффициент Кориолиса,  $u'_q$  – проекция скорости отсоединенного расхода на направление основного потока.

Решение задачи с использованием данного уравнения является приближенным, так как не учитывается влияние силы инерции на поток, особенно это актуально для случая неньютоновских жидкостей. К таким работам так же относятся труды [1–12] связанные с решением проблем орошения, проектирования распределительных устройств и нефтеперерабатывающих установок.

Вместе с тем дискретный отбор жидкости вдоль потока обладает рядом особенностей и поэтому не может быть описан с применением уравнения Мещерского, что приводит к необходимости проведения экспериментальных исследований.

## 3. Цель исследования

Целью данной работы является проведение экспериментальных исследований ламинарных и турбулентных течений вязких и аномально-вязких жидкостей при дискретном отборе жидкости в потоке с помощью насадок, а также детальное исследование влияния кривизны канала на гидродинамические потери энергии при условии постоянства расхода, а также при наличии транзитного расхода.

Задачи данных исследований заключаются в установлении зависимостей, характеризующих изменения давления при дискретном отборе жидкости вдоль трубопровода, как для прямолинейного, так и для трубопроводов с заданной степенью кривизны. На основании этих данных при их обобщении провести аппроксимацию кривых и получить аналитические зависимости позволяющие проводить гидравлический расчет подобного вида потока.

## 4. Исследования дестабилизации потока в канале

Для решения этой поставленных задач был создан экспериментальный стенд (рис. 1) на котором вдоль трубопровода на одинаковом расстоянии были установлены серии насадок.

На основании результатов экспериментов по определению давления и расхода построены графики характеризующие изменения давления по длине. В качестве примера на рис. 2 представлены характерные функции в зависимости от числа  $Re$ .

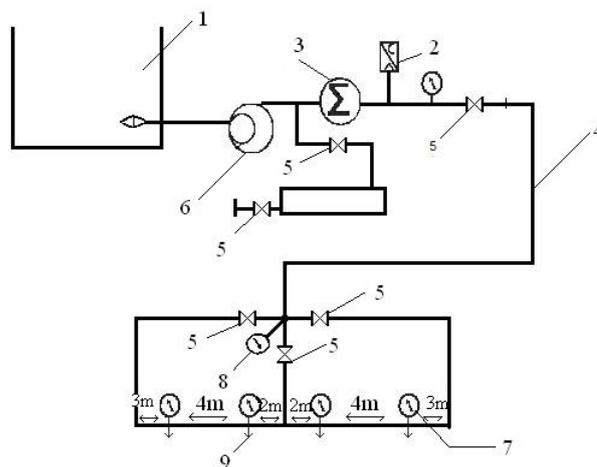


Рис. 1. Схема экспериментального стенда: 1 – мерная емкость 1м<sup>3</sup>; 2 – аналоговый преобразователь давления; 3 – преобразователь расхода жидкости электромагнитный; 4 – труба водопроводная ПЕ 80 Ø35; 5 – вентиль Ø50 мм.; 6 – насос центробежный; 7, 8 – манометр; 9 – дренаж Ø 8-10 мм

Как видно из этих графиков, на участках между насадками, где осуществлялся отбор жидкости, число  $Re$  изменялось в достаточно широком диапазоне. Что подтверждает предположение о нестабилизированном течении характерных кривых  $p=p(x)$  для прямолинейного и криволинейного трубопроводов рис. 2, а, б

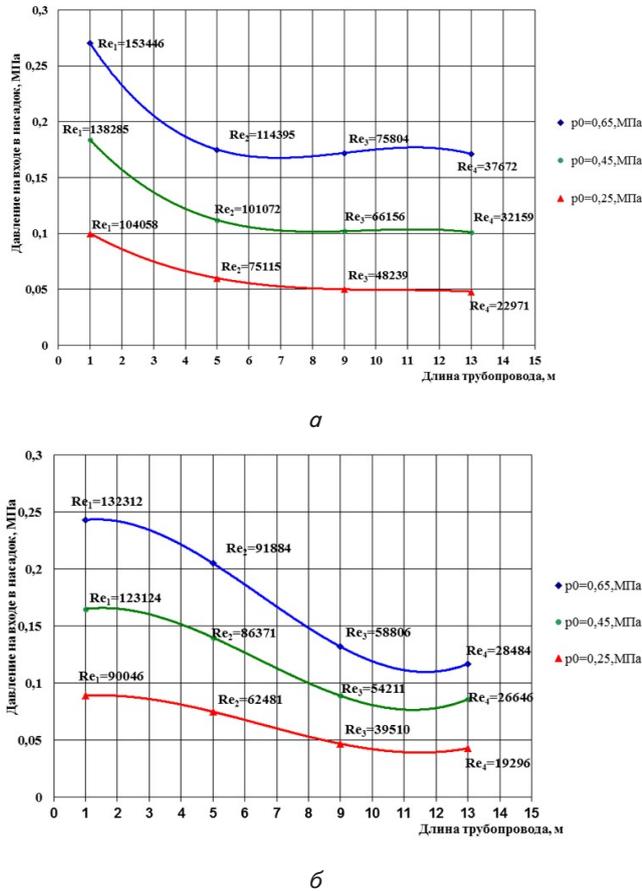


Рис. 2. Зависимости характеризующие изменение давления по длине: а – прямого трубопровода; б – криволинейного трубопровода

Как видно из представленных графиков, они имеют криволинейный характер, т. е. величина  $\frac{dp}{dx} \neq const$ , а,

следовательно, течение является нестабилизированным [7], то есть на поток помимо сил вязкого трения действуют силы инерции от конвективного ускорения.

Следует отметить, что опыты проводились на воде и водных растворах пенообразующих сред. Для прямых трубопроводов аналогичные результаты получены и описаны в работах других авторов. Например, некоторые результаты исследований представлены в работах Федорца А. А. и Маланчука З. Р. [5], где на основании эксперимента предпринята попытка получения коэффициента трения  $\lambda$  (режим турбулентный  $21787 \leq Re \leq 39565$ ).

В рассматриваемом случае при одинаковых условиях на входе в трубопровод (давление на входе  $p_0$ ,

числе Рейнольдса  $Re_0 = \frac{\rho u_{вх} d}{\mu_0}$ ) изменение давление по

длине потока в криволинейном канале и прямолинейном различны. Как видно из рис. 2, это различие наблюдаемое вдоль потока, связано с изменением средней скорости по его длине и нелинейной зависимостью  $p = p(x)$ .

На рис. 2 представлены три зависимости изменение давления по длине потока: 1 – для случая, когда отбора жидкости по длине нет (расчет по формуле Дарси-Вейсбаха); 2–3 для случаев с отбором жидкости в прямолинейном и криволинейном каналах.

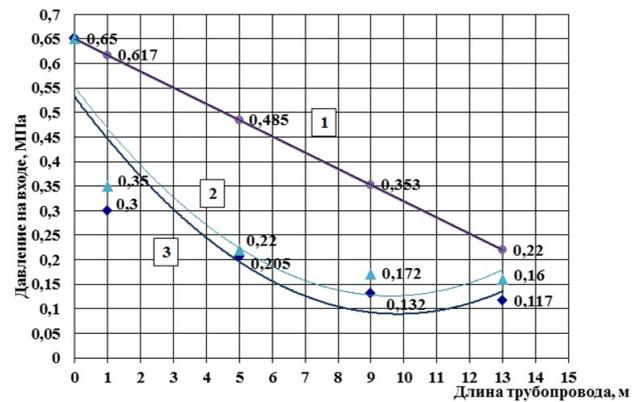


Рис. 3. Зависимость  $p=p(x)$  для различных случаев: 1 – для случая, когда отбора жидкости по длине нет; 2-3 – для случаев с отбором жидкости в прямолинейном и криволинейном каналах при числе Рейнольдса на входе равном  $Re=202440$

На рис. 3 приведено сопоставление функции  $p(x)$  для случаев потока с постоянным расходом  $Q=const$  и переменным расходом  $Q \neq const$  при одних и тех же значениях числа  $Re$  на входе в трубопровод.

Анализ представленных на графиках экспериментальных данных показал, что для криволинейного канала перепад давления  $\Delta p_k$  можно представить как величину, равную:

$$\Delta p_k = \Delta p_0 - \delta \Delta p_{Q \neq const} + \delta \Delta p_{\frac{1}{R} \neq const}, \tag{1}$$

где  $\Delta p$  – перепад давления на прямолинейном участке трубы при условии отсутствия отбора расхода по длине (т. е. перепад давления при стабилизированном течении, рассчитанное по формуле Дарси-Вейсбаха);  $\delta \Delta p_{Q \neq const}$  – коррекция перепада давления за счет наличия отбора жидкости (т. е. не стабилизированное течение);  $\delta \Delta p_{\frac{1}{R} \neq const}$  – коррекция перепада давления за счет наличия кривизны канала (нестабилизированное течение в криволинейном канале). На основании полученных данных для рассматриваемого диапазона чисел  $Re$  были получены численные значения величин  $\delta \Delta p_{Q \neq const}$  (табл. 1)

В связи с дискретным отбором жидкости по длине, перепад давления  $\Delta p_k$  (в зависимости от реологических особенностей жидкости) может существенно отличаться от величины  $\Delta p_0$ . Воспользовавшись понятием «эффективной длины» [6], равной  $(Z - \Delta l)$ , можно получить зависимость для определения

$\Delta p_{Q \neq const}$ , однако для участка фиктивной длины, где величина, по аналогии с предложениями Бэгли, может быть определена через некоторый поправочный коэффициент  $k$ , т. е.  $\Delta l = kR$  ( $R$  – радиус канала).

Таблица 1

Значение величины  $\delta \Delta p_{Q \neq const}$  и при различных числах Рейнольдса

Число Re на входе	$\delta \Delta p_0$ стабилизированного потока	$\delta \Delta p_{Q \neq const}$	$\delta \Delta p_{Q \neq const} \frac{1}{R} \neq 0$
202440	0,45	0,04	0,06
163800	0,30	0,025	0,045
113400	0,158	0,005	0,044
50320	0,075	0,0008	0,03

Следовательно, перепад давления на прямолинейном участке трубы длиной  $Z$  с дискретным отбором жидкости по длине можно определить по формуле Дарси-Вейсбаха, где  $Z = Z_0 - kR$

$$\Delta p_{Q \neq const} \approx \lambda \frac{z_0 - kR}{2R} \rho u_0^2. \tag{2}$$

Предполагается, что коэффициент  $\lambda$  определен для случая когда  $Re = Re_{вх}$ .

На рис. 4 показан характер зависимостей  $\Delta p_0$  при  $Q = const$  и  $Q \neq const$ , позволяющей сделать оценку величин фиктивной длины  $\Delta L$ .

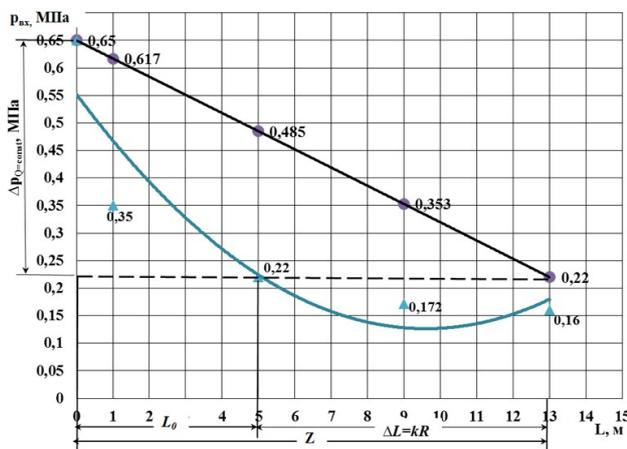


Рис. 4. Зависимость между  $\Delta p_{Q \neq const}$  и  $\Delta p_0$

Опыты показали, что  $k$  существенно зависит от закона изменения расхода по длине трубопровода. На основании представления о  $\Delta p_{Q \neq 0}$  и ее сопоставления с величиной  $\Delta p_0$  были получены значения корректирующего коэффициента  $k$ .

На рис. 5 показано насколько перепад давления  $\Delta p_{пр}$  в прямолинейном трубопроводе отличается от перепада давления  $\Delta p_{кр}$  в криволинейном трубопроводе.

Сопоставление данных результатов показывает, что с определенной степенью точности

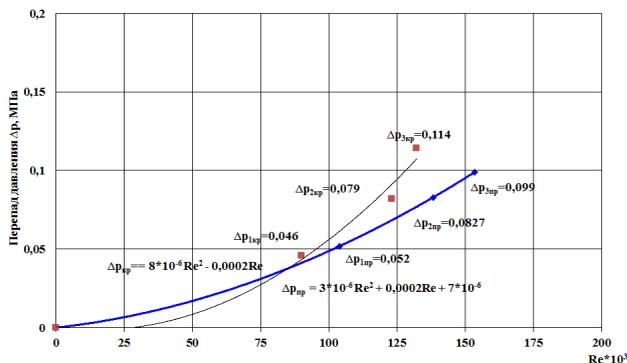


Рис. 5. Зависимости характеризующие перепад давления в криволинейном  $\Delta p_{кр}$  и прямолинейном  $\Delta p_{пр}$  трубопроводах от числа Re (жидкость вода)

$$\Delta p_{кр} = \Delta p_{прям} \cdot f\left(\frac{1}{k}\right). \tag{3}$$

По данным работы [1] при законе отбора жидкости имеющем вид:

$$Q = Q_0 - q_0 x = Q_0 \left(1 - \frac{x}{Z}\right). \tag{4}$$

изменение давления по длине можно записать так

$$\frac{p_{Q \neq 0}}{\rho g} = \frac{p_0}{\rho g} + \frac{16 + (4n + 21(5n + 3)Q_0^2 x)}{\pi^2 g D^4} \left(2 - \frac{x}{Z}\right) - \frac{4KZ}{\rho g D} \left[\frac{8Q_0(3n + 1)}{\pi D^3 n}\right]^n \frac{1}{n + 1} \left(1 - \left(1 - \frac{x}{Z}\right)^{n+1}\right). \tag{5}$$

Полученная зависимость (5) позволит упростить процесс определения изменения величины давления при изменяющемся по длине расходе.

## 5. Выводы

Проведены экспериментальные исследования течения вязкой жидкости в трубопроводах с дискретным отбором расхода по длине в диапазоне чисел Рейнольдса от 19000 до 132000. Показано, что характер данных зависимостей носит нелинейный характер, что указывает на дестабилизацию потока за счет изменения расхода. Результаты получены для двух случаев: прямолинейного и криволинейного трубопроводов. На основании экспериментальных данных осуществлена аппроксимация зависимости давления  $p = p(x)$  и проведено сопоставление результатов с данными для стабилизированного течения. Такое сопоставление позволило представить перепад давления в рассматриваемых потоках как сумму перепадов давления для стабилизированного течения рассчитанного по формуле Дарси-Вейсбаха и некоторые добавки связанные с отбором жидкости и кривизной трубопровода.

Литература

1. Федорец, А. А. Определение коэффициента гидравлического трения в трубопроводах при отсоединении расхода [Текст] / А. А. Федорец, З. Р. Маланчук // Гидравлика и гидротехника. – 1980. – Вып. 31. – С. 58–62.
2. Кравчук, А. М. Движение жидкости в трубопроводах с отсоединенным расходом вдоль пути [Текст] : автор. ... кандид. техн. Наук / А. М. Кравчук. – К., 1985. – 23 с.
3. Животовский, Б. А. К вопросу о расчете трубопроводов с непрерывно меняющимся расходом по длине [Текст] / Б. А. Животовский // Труды университета Дружбы народов им. П. Лумумбы. – 1973. – Вып. 65. – С. 132–137.
4. Мещерский, И. В. Уравнение движения точки переменной массы в общем случае [Текст] / И. В. Мещерский. – М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1952. – С. 125–130.
5. Henrik, Walden Mechenika cieczy i garow b inzynierii sanitarnej [Text] / Henrik, Walden, Jezzy, Stsiak. – Arkdy, Warszawa, 1971. – 554 p.
6. Яхно, О. М. Гидродинамический начальный участок [Текст] / О. М. Яхно, В. С. Кривошеев, В. М. Матиiega // Черновці, «Зелена Буковина», 2004. – 200 с.
7. Повх, И. Л. Техническая гидромеханика [Текст] / И. Л. Повх. – М.: Машиностроение, 1976. – 504 с.
8. Каминер, А. А. Гидромеханика в инженерной практике [Текст] / А. А. Каминер, О. М. Яхно. – Техника, 1987. – 175 с.
9. Яхно, О. М. Основы реологии полимеров [Текст] / О. М. Яхно, В. Ф. Дубовицкий. – Издательское объединение «Вища школа», 1976. – 188 с.
10. Торнер, Р. В. Основные процессы переработки полимеров (теория и методы расчета) [Текст] / Р. В. Торнер. – М.: Химия, 1972. – 456 с.
11. Яхно, О. М. О возможности применения уравнения Мищерского для описания движения неньютоновской жидкости по трубам с изменяющимся расходом [Текст] / О. М. Яхно, Д. В. Колесніков, Н. В. Семинская // Восточно-Европейский Журнал передовых технологий. – 2013. – Т. 3, № 7 (63). – С. 28–32.
12. Бенин, Д. М. Влияние формы элементов проточной части на регулиющую способность гидродинамических стабилизаторов расхода [Текст] / Д. М. Бенин // Перспективы науки. – 2010. – № 11 (13). – С. 59–63.

*Представлено аналітичне рішення рівнянь руху в'язкої рідини, що дозволяє враховувати вплив гідродинамічних умов входу в канал на процес розвитку поля швидкостей на початковій ділянці. Визначені граничні умови, властиві течіям робочих середовищ які найбільш часто зустрічається у технологічних процесах. Отримані теоретичні результати процесу течії при різних умовах входу досить точно узгоджуються з експериментальними даними*

*Ключові слова: рішення рівнянь руху, умови входу в гідродинамічний початковий ділянку*

*Представлено аналитическое решение уравнений движения вязкой жидкости, позволяющее учитывать влияние гидродинамических условий входа в канал на процесс развития поля скоростей на начальном участке. Определены граничные условия, присущие течениям рабочих сред наиболее часто встречающихся в технологических процессах. Полученные теоретические результаты процесса течения при различных условиях входа достаточно точно согласуются с экспериментальными данными*

*Ключевые слова: решение уравнений движения, условия входа в гидродинамический начальный участок*

УДК 532.556

# ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРО- ДИНАМИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ВХОДА В КАНАЛАХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

**С. В. Носко**

Кандидат технических наук, доцент  
Кафедра прикладной гидроаэромеханики и  
механотроники  
Национальный технический университет Украины  
“Киевский политехнический институт”  
пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056  
E-mail: noskosv@ukr.net

## 1. Введение

В настоящее время, требования по увеличению производительности, качеству получаемых промышленных изделий и их себестоимости во многом зависят

от характера и особенностей течения рабочих сред в процессе технологии.

Дестабилизирующие действия, приводящие к инерционности потока с последующей деформации