

5. Шор, Я.Д. Таблицы для анализа и контроля надежности. [Текст] / Я.Д. Шор, Ф.И. Кузьмин – «Советское радио», М, 1968. – 288 с.
6. Кренделл, С. Случайные колебания. [Текст] /С. Кренделл – «Мир», М, 1967 – 356 с.
7. Сарычев, Ф.Г. Исследование погрешностей определения параметров возбужденного состояния по данным дискретного спектрального анализа. [Текст] /Ф.Г. Сарычев, В.Н. Быченков, Л.Л. Рогачев; РК техника, серия 7, выпуск 8 – ГОНТИ 9, 1972 – С. 31 – 38.
8. Харкевич, А.А. Спектры и анализ. [Текст] /А.А. Харкевич – Физматгиз, 1962. – 236 с.
9. Мошкин, Е.К. Нестационарные режимы работы ЖРД. [Текст] /Е.К. Мошкин – «Машиностроение», 1970. – 336 с.
10. Методика измерений параметров ЖРД и изделий при огневых стендовых испытаниях. [Текст] / НИИ-229, МОМ, 1965. – С. 5 – 17.

УДК 532.516

# СТРУКТУРА ПОТОКА В КАНАЛАХ СЛОЖНОЙ КОНФИГУРАЦИИ ПРИ РАДИАЛЬНОМ ПОДВОДЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО РАСХОДА

**С. В. Носко**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: Nosko S.V.@ukr.net

**А. А. Шевчук\***

E-mail: Shevchuk\_O\_A1992@ukr.net

\*Кафедра прикладной гидроаэромеханики и

механотроники

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт»

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

*Представлені аналітичні і експериментальні дослідження нестабілізованої течії при радіальному підводі додаткових витрат рідини в область місцевого опору. Отримані результати дозволяють оцінити вплив зміни гідродинамічних умов входу в вузьку частину каналу на структуру потоку і перерозподіл тиску по довжині*

*Ключові слова: місцеві опори, радіальний підвід витрат, перерозподіл тиску, нестабілізована течія, гідродинамічні умови*

*Представлены аналитические и экспериментальные исследования нестабилизированного течения при радиальном подводе дополнительного расхода жидкости в область местного сопротивления. Полученные результаты позволяют оценить влияние изменения гидродинамических условий входа в узкую часть канала на структуру потока и перераспределения давления по длине*

*Ключевые слова: местные сопротивления, радиальный подвод расхода, перераспределение давления, нестабилизированное течение, гидродинамические условия*

## 1. Введение

Многие системы и узлы технологического оборудования имеют каналы сложной конфигурации, которые не являются конструктивными недоработкам, а имеют вполне определенное функциональное назначение и играют важную роль в обеспечении данного производственного процесса.

Эксплуатационные характеристики данного оборудования не всегда совпадают с их расчетной эффективностью, что обусловлено гидродинамическими особенностями течения, и в частности, условиями входа среды в рабочие зоны аппаратов. Все это свидетельствует о важности изучения гидродинамики технологического оборудования с точки зрения обеспечения заданного распределения потока и достижения максимальной эффективности их работы.

## 2. Анализ исследований и публикаций

Исследованием условий входа и развитием профиля скорости на гидродинамическом начальном участке занимались ряд авторов.

В работе [1-4] показано, что характер профиля скорости на входе потока в трубопровод и длина его начального участка зависят не только от режима течения (числа Рейнольдса), но и от формы и геометрических параметров предшествующих участков. И наиболее действенным способом является установка на входе плавного коллектора, очерченного по лемнискате.

Авторы работы [5-7] исследовали влияние условий входа на гидродинамические характеристики потока на начальном участке при различных формах и площадях поперечного сечения переходных

участков. И для практических расчетов предложили классифицировать переходные участки по следующим признакам: по изменению площади поперечного сечения по длине и по характеру формы поперечного сечения вдоль оси.

В исследованиях [8-10] приведен анализ перераспределения кинематической энергии потока на начальном участке прямоугольного канала.

Показано, что длина участка стабилизации течения зависит от формы эпюры скорости во входном сечении, числа Рейнольдса, геометрических параметров местного сопротивления и реологических свойств жидкости.

В предыдущей работе [11] были исследованы кинематические характеристики потока в канале с резко изменяющейся геометрией методами визуализации. Полученная модель течения в области внезапного сужения (рис. 1) указывает на наличие застойных зон и вторичных течений (А - основной вихрь; В - кольцевая изолированная полость) и трех характерных участков течения ( $L_{п}$  - предначальный;  $L_{м.с.}$  - резкого сужения;  $L_{н}$  - начальный).

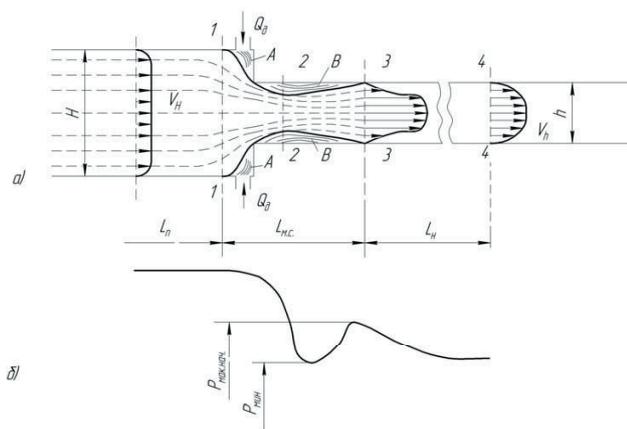


Рис. 1. Схема течения в области внезапного сужения и распределение давления по длине канала:  
 а) А – основной вихрь; В – зона сжатия потока;  
 $L_{п}$  – предначальный участок;  $L_{м.с.}$  - участок резкого сужения;  $L_{н}$  - начальный участок; б) распределение давления по длине канала

### 3. Формирование целей и задач

Задача данной работы состоит в изменении условий течения на входе в узкую часть канала при подаче дополнительного расхода в радиальном направлении по отношению к оси канала и исследовании степени изменения гидродинамических характеристик потока по длине.

При проведении экспериментальных исследований в область внезапного сужения (зона А) с отношением площадей течений ( $S_1/S_2 = 2$ ) в радиальном направлении относительно основного потока с расходом  $Q_{осн.}$  подводился дополнительный расход  $Q_{доп.}$ .

На рис. 2 показаны кривые распределения давлений на начальном участке как зависимость между критерием Эйлера  $Eu = P / 0.5V_{cp}^2$  и безразмерной длины канала  $X/H$  ( $H$  - ширина канала).

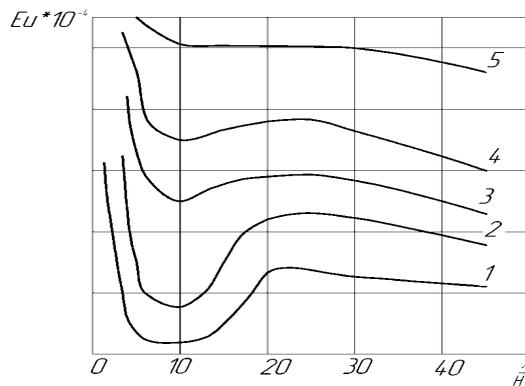


Рис. 2. Распределение давлений по длине начального участка при соотношении  $Q_{доп.} / Q_{осн.}$ : 1-0; 2-0,06; 3-0,1; 4-0,19; 5-0,24

При отношении  $Q_{доп.} / Q_{осн.} = 0,24$  в диапазоне чисел Рейнольдса  $10^3 - 10^5$  anomalous pressure of curve 5 with extremum  $P_{min}$  (zone of vortex formation В) is not observed, which is explained by the change of conditions of entry into the initial section  $L_{н}$ , (as experimental data show the form of velocity profiles in this section close to rectangular).

Следовательно, на участке канала, где находится область сжатия потока В, происходит перераспределение энергии потока, при которой часть энергии передается обратно основному потоку. Размеры области сжатия потока В и давления  $P_{min}$  зависят от геометрических параметров местного сопротивления и числа Рейнольдса. В свою очередь от  $P_{min}$  зависят максимальное давление  $P_{max}$  на входе в гидродинамический начальный участок и характер пьезометрической линии на нем.

Значение давления  $P_{min}$ , как функцию отношений  $Q_{доп.} / Q_{осн.}$  можно определить следующим выражением:

$$\frac{P_{min}}{P_0} = \left( 1 + \frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}} \right)^{f^*(Re)}, \tag{1}$$

где  $P_0$  – гидростатическое давление во входном сечении гидродинамического участка;  $f^*(Re)$  – показатель степени, зависящий от числа Рейнольдса  $Re$ .

На рис. 3 показана зависимость показателя степени  $f^*(Re)$  от числа Рейнольдса.

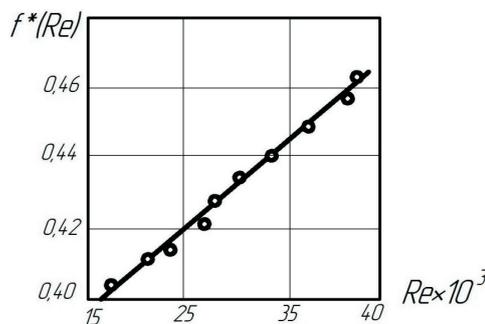


Рис.3. Зависимость показателя степени  $f^*(Re)$  от числа Рейнольдса

Гидравлические потери на участке нестабилизированного течения  $L_H$  можно определить по формуле для стабилизированного потока в канале, имеющего некоторую фиктивную длину  $L_{ст.} + L_{фик.}$ . Проведенные в работе [5] исследования позволили вычислить дополнительные потери давления, связанные с проявлением сил инерции в потоке на начальном участке в следующем виде:

$$\Delta P_{ин} = \Delta P_{ст.} + \Delta P_{доп.}, \tag{2}$$

где  $\Delta P_{ст.}$  – потери давления для стабилизированного течения;

$\Delta P_{доп.}$  – дополнительные потери давления связанные со структурой нестабилизированного потока.

В табл. 1 приведены значения величины  $\Delta P_{доп.}$  при  $X=L_H$ , определённые в результате экспериментальных исследований.

**Таблица 1**

Зависимость потерь давления  $\Delta P_{доп.}$  от соотношения расходов  $Q_{доп.} / Q_{осн.}$ .

$Re \cdot 10^4$	$\frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}}$	$Eu \cdot 10^{-4}$	$Re \cdot 10^4$	$\frac{Q_{доп.}}{Q_{осн.}}$	$Eu \cdot 10^{-4}$ при $X=L_H$
1.5	0.10	9.10	2.6	0.05	9.80
	0.16	3.38		0.09	11.87
	0.24	2.01		0.13	3.28
	0.28	7.65		0.23	3.65
	0.35	23.22		0.26	6.97
1.8	0.06	5.06	4.0	0.07	5.03
	0.08	2.60		0.13	4.81
	0.16	2.88		0.19	5.25
	0.22	5.92		0.24	8.42
	0.28	9.78		0.26	10.03
	0.34	15.24			

Данные табл. 1 показывают характер зависимости потерь давлений  $\Delta P_{доп.}$  от соотношения расходов  $Q_{доп.} / Q_{осн.}$ .

Выразив величину ( $\Delta P_{доп.}$ ) через поперечную составляющую скорости потока  $V_y$  на участке нестабилизированного течения зависимостью вида.

$$\Delta P_{доп.} = \rho V_y \frac{\partial}{\partial y} \left( \int_0^x \frac{\partial V_y}{\partial y} dx \right), \tag{3}$$

где  $\rho$  - плотность жидкости; величина  $\Delta P_{доп.} \rightarrow 0$  при  $X \rightarrow L_H$  также как и значение поперечной скорости  $V_y$ . Следовательно, турбулентное течение на гидродинамическом начальном участке канала можно описать дифференциальным уравнением

$$\rho \frac{\partial V_x}{2 \partial x} = \lambda_p \frac{V_{хвп}}{2H} + \mu \left( \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right), \tag{4}$$

где  $\lambda$  - коэффициент трения;  $\mu$  - динамическая вязкость жидкости.

Вводя обозначение  $K_1 = \frac{\mu}{\rho V_x}$ ,  $K_2 = \lambda \frac{U_{ср}}{H}$  и считая что  $\left| \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} \right| \ll \left| \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} \right|$ , преобразуем дифференциальное уравнение (4) к виду.

$$\frac{\partial U_x^2}{\partial x^2} = K_1 \frac{\partial^2 U_x^2}{\partial y^2} + K_2. \tag{5}$$

Предположим, что  $V_x^2$  является произведением функций  $\Phi^*(y)$  и  $\Psi^*(y)$ , то есть  $V_x^2(x,y) = \Phi^*(y) \cdot \Psi^*(x)$  и  $(Q_{доп.} / Q_{осн.}) > 0.16$  (профиль скорости на входе прямоугольный). Следовательно, уравнение (4) можно проинтегрировать в пределах изменения  $x$  от 0 до  $L_H$ .

$$V_x^2 - (V_x)_{x=0}^2 - \lambda x \frac{V_{хвп}^2}{H} = \partial^2 V_x^2 K_1 \int_0^{L_H} \Psi^*(x) \frac{\partial x}{\partial y^2} \Psi(x). \tag{6}$$

Для определения интеграла, стоящего в правой части уравнения (6) используем уравнение неразрывности среды и введем новые переменные.

$$\varepsilon(x) = \frac{\int_0^{L_H} \Psi^*(x) dx}{\Psi^*(x)}, \tag{7}$$

$$t^2(x) = \sqrt{\frac{1}{N^* \varepsilon(x)}}, \tag{8}$$

$$V_x^2(x,y) - V_y^2(x) = V_x^2(x,y) - V_{хвп}^2 \left( 1 - \frac{\lambda L_H}{H} \right), \tag{9}$$

В дальнейшем преобразуем уравнение (6) с учетом принятых переменных (7), (8) и (9) к следующему виду.

$$\frac{\partial^2}{\partial y^2} (V_y^2 - V_x^2) + t^2(x) \cdot (V_y^2 - V_x^2) = 0 \tag{10}$$

или

$$c - t^2(x)c = 0,$$

$$\text{если } c = V_y^2 - V_x^2 \text{ и } -dV_x^2 = dc. \tag{11}$$

Согласно [12], дифференциальное уравнение (10) имеет общее решение, которое можно представить следующим образом.

$$C \begin{cases} q_1 \cos |t(x) + q_2 \sin |t(x), & \text{при } t(x) < 0 \\ q_1 + q_2 y, & \text{при } t(x) = 0 \\ q_1 \cos y \cdot t(x) + q_2 \sin y \cdot t(x), & \text{при } t(x) > 0 \end{cases}, \tag{12}$$

где  $q_1$  и  $q_2$  - коэффициенты, принимающие численное значение.

Учитывая, что  $i(x)$  в данном представлении величина положительная, то согласно выражению (12), получим.

$$V_x(x,y) = V_{ср} \left[ \left( 1 + \frac{\lambda x}{H} \right) - (q_1 \cos y \cdot t(x) + q_2 \sin y \cdot t(x)) \right], \tag{13}$$

причем значения  $q_1, q_2$  и  $i(x)$  могут быть получены из уравнения неразрывности потока и краевых условий.

Условия неразрывности среды для течения вязкой жидкости в прямоугольном канале запишем в виде.

$$\int_0^{2H} (V_{cp}, V_x) dy = 0. \quad (14)$$

Таким образом, коэффициент  $q_2=0$  и это говорит о том, что эпюра продольной скорости для гидродинамического начального участка окончательно может быть представлена.

$$V_x(x, y) = V_{max} [1 - q_1^2 \cos^2(x) \cdot y]^{0.5}. \quad (15)$$

Используя выражение (7) и (8) получим следующее выражение:

$$\frac{U_{cp}^2}{U_{max}^2} = \frac{1}{\frac{1 - \lambda L_H}{D_{пр.}}} \quad (16)$$

где  $D_{пр.}$  - приведенный диаметр канала

Проведенный выше анализ дает возможность описать рассматриваемую картину течения вязкой жидкости. Используя уравнения неразрывности среды и зависимость (13) или (15) можно аналитическим путем получить зависимость для поперечной составляющей осредненной скорости, а применив выражение (2) и для дополнительных потерь давления на начальном участке.

Величина  $\Delta P_{доп.}$  в формуле (2) отражает влияние перестройки эпюры скоростей от прямоугольной во

входном сечении до эпюры полностью развитого стабилизированного течения и дает оценку потерь давления с учетом условий входа в канал.

Следовательно, потери давления при нестабилизированном течении вязких жидкостей на начальном участке целесообразно определять по формуле:

$$\Delta P_{доп.} = L_H \frac{\lambda V_{xcp}^2}{2gH} + K_1 \frac{V_{xcp}^2}{2g}, \quad (17)$$

где  $K_1$  - параметр, значение которого зависит от условий входа, так например при течении воды (при  $t=20^\circ\text{C}$ ,  $\gamma=0,011 \cdot 10^{-4}$  м/с) в прямоугольном канале, данный параметр принимает значение равное 0,048.

#### 4. Выводы

Полученные решения позволяют учитывать влияние гидродинамических условий входа в канал на процесс развития поля скоростей и давлений на начальном участке. Данные исследования нестабилизированного течения вязких жидкостей после их анализа и оценки вносят существенные коррективы при разработке методик гидродинамического расчета технологического оборудования.

#### Литература

- Идельчик, И. Е. Аэрогидродинамика технологических аппаратов [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1983. – 351с.
- Ливси, И. Л. Поток через неоднородный сетчатый фильтр. [Текст]/ И.Л. Ливси, Е.М. Лос / Ж. Fluid Mech., 1973, том 59, часть 4, – 737-743с.
- Дэвис, Г. Поток воздуха через сетчатый экран. [Текст]/ Г.Дэвис/ Гидравлика и Аэрогидродинамика. Симпозиум Pull. div. Perg. Pr. 1964, – 191-212с.
- Богер, Д.В. Поток Вязкоупругой Жидкости через Резкое Сжатие [Текст] / Богер Д.В., Рама Мерфи А.В./ "Aheol. Acta", 1972, том 11, – 61-69с.
- Самохвалов, А.С. Течение жидкости в переходных участках [Текст] / А.С. Самохвалов, С.В. Носко, О.М. Яхно./ Химическое машиностроение. – К.: Техника, - 1982. №42. – с.65-70.
- Накамура, Р. Профиль Скорости в Вязкоупругом Потоке на Входе Трубы. [Текст] / Накамура Р, Вошиока Н., Хигучи М./ Журнал химического машиностроения Японии, 1976, том 9, №4, – 291-293с.
- Оливер, Д. Р. Характер движения потока в вязкоупругой жидкости на входе отверстия. [Текст] / Оливер Д.Р., Брэг Р./ Канадский журнал по Химическому машиностроению., 1973, том 51, – С.287-290.
- Яхно, О.М. Исследование факторов влияния на длину гидродинамического участка [Текст] / О.М. Яхно, С.В. Носко. И.Е. Онищенко / Известие ВУЗов. – М.: Машиностроение, - 1981. №2. - С.72-75.
- Фюрштайн, И.А. Поток в резких расширениях труб [Текст] / И.А.Фюрштайн, Г.Ф. Раунд / Канадский журнал по Химическому машиностроению., 1974, том 52. Октябрь. – 661-663с.
- Мотойоши, И. Устойчивый ламинарный поток во входной области воздуховода прямоугольного сечения [Текст] / Т.Мотойоши, И. Йошиюки/ Вестник Японского Общества Инженеров-Механиков, 1981. Том 24, №193, С. 1151-1158.
- Носко, С.В. Дослідження кінематичних характеристик аномально-в'язких рідин в каналах з різко змінною геометрією методами візуалізації [Текст] / С.В. Носко, В.О. Булигін./ Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Х.: - 2012. №6/7(60). – С. 47-50.
- Камсе, Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям [Текст]/ Э. Камке. – М.: Наука, 1971. – 320с.