

УДК 621.643:532

В. Л. СНЕЖКО, М. С. ПАЛИИВЕЦ

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ПОТОКА И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УЗЛА «РЕГУЛИРУЕМАЯ ЗАДВИЖКА – ТРОЙНИК» В НАПОРНОМ ВОДОВОДЕ

Представлены результаты экспериментальных исследований кинематической структуры потока и местных сопротивлений узлов напорных трубопроводов.

Кинематическая структура потока, местные сопротивления, длина влияния.

The article presents the results of experimental researches of the flow kinematic structure and local resistances of pressure pipe lines units.

Unit resistances, kinematic structure of turbulent flows, local resistance of pressure pipelines units, field of velocities, inherent resistance coefficient, nucleus of velocities.

Изучению кинематической структуры турбулентных потоков при наличии единичных и узловых местных сопротивлений было посвящено много работ известных ученых. Сопротивления тройников, полученные И. Е. Идельчиком, считаются классическими в гидравлике, в этой же области работали П. Н. Каменев, В. Н. Талиев, С. И. Левин, А. Д. Альтшуль, А. М. Курганов, П. Г. Киселев и В. И. Калицун, М. М. Андрияшев. Зависимости коэффициентов местного сопротивления от перемещения задвижки квадратного сечения были получены Б. И. Яньшиным. Вопросы узловых сопротивлений занимались В. А. Зюбан, П. А. Ковалев-Кривоносов, И. З. Гольденберг, Е. П. Шольц, А. В. Максименко, М.-Р. А. Умбрасас.

Анализ экспериментальных данных позволяет сделать вывод о том, что все многообразие факторов, влияющих на кинематическую структуру турбулентного потока, может быть отражено изменениями его скоростного поля. Согласно гипотезе Л. Прандтля, длина пути турбулентного перемешивания l пропорциональна расстоянию от стенки трубопровода y :

$$l = \chi y,$$

где χ – универсальная постоянная.

Значение $\chi = 0,4$, предложенное

Т. Карманом, не во всех случаях совпадает с экспериментальными данными. В работах А. Д. Альтшуля, А. П. Зегжды, Ф. А. Шевелева предлагается считать l функцией следующих параметров:

$$l = f\left(\frac{yu_*}{\nu}, \frac{y}{\delta}, \frac{y}{\rho \cdot u_*^2} \cdot \frac{dP}{dx}, \dots\right),$$

где u_* – местная скорость потока; ν – кинематическая вязкость; δ – относительная шероховатость стенок; ρ – плотность жидкости; P – давление; x – продольная координата.

Нетрудно заметить, что величина χ зависит от тех же характеристик потока, что и коэффициент Кориолиса α , характеризующий неравномерность распределения скоростей по течению. Следовательно, определенным условиям движения потока соответствует только одна форма скоростного поля, характеризуемая коэффициентом его кинетической энергии.

Гидравлические сопротивления в напорном водоводе связаны с кинематической структурой потока, изменение кинематики влечет за собой и изменение сопротивлений. Задача гидравлических исследований турбулентных напорных потоков, включающих местные сопротивления, состоит в том, чтобы выявить взаимосвязь среднестатистических характеристик поля скоростей и значений коэффициентов местных сопротивлений ζ .

Форма зависимости коэффициентов взаимовлияния местных сопротивлений

от расстояния между ними соответствует характеру изменения параметров в зоне влияния местного сопротивления, стоящего выше по потоку. В результате зависимость для суммарного сопротивления узла имеет следующий вид:

$$\zeta_{\text{узла}} = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_n, \alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, L_1, L_2, \dots, L_n, Re_1, Re_2, \dots, Re_n),$$

где ζ – коэффициенты местных сопротивлений компонентов; α – коэффициент Кориолиса перед последующим сопротивлением, формируемый предыдущим; L – расстояния между сопротивлениями; Re – число Рейнольдса.

Авторами было исследовано достаточно часто встречающееся на практике узловое сопротивление – тройник, размещенный в напорном водоводе и работающий на малой подаче. В экспериментах боковое ответвление, расположенное под углом 30° к направлению течения, было полностью перекрыто, а подача транзитной ветки регулировалась одно- либо двухсторонней прямоугольной задвижкой без выемки для клапана (рис. 1).

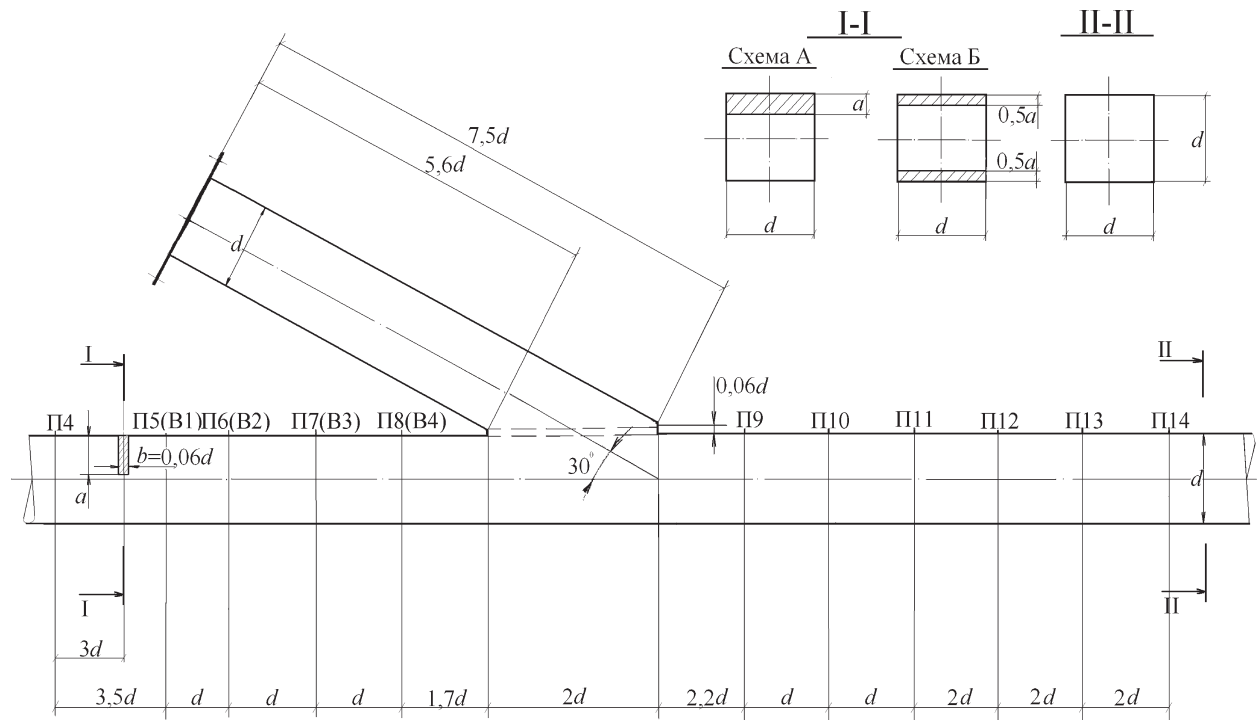


Рис. 1 Схема исследуемого узла: d – гидравлический диаметр водовода; П4...П14 – пьезометры; В1...В4 – вакуумметры

Опыты были выполнены в лаборатории гидравлики Московского государственного университета природообустройства, рабочей жидкостью служила пресная вода. Модельная установка представляла собой напорный водовод с участком стабилизации за входным устройством более 20 диаметров, узлом местных сопротивлений и концевым напорным участком, длина которого превышала 30 диаметров водовода. На модели изучались гидравлические характеристики трубопровода квадратного сечения с эквивалентной шероховатостью $\Delta_s = 0,03$ мм. Местные сопротивления находились на расстоянии меньшем,

чем длины их влияния, что характерно для ответвлений систем водоснабжения и гидротехнических водоводов.

Исследованию взаимного влияния предшествовали эксперименты с отдельно установленными элементами, являющимися составными частями выбранных сочетаний, и исследования гидравлического трения на длинном прямолинейном участке водовода. Во всех случаях прослеживалась связь между изменением формы скоростного поля, которое характеризовалось коэффициентом Кориолиса, и изменением гидравлического сопротивления.

При турбулентном движении с достаточно высокими числами Рейнольдса

коэффициенты местных сопротивлений ζ представляют собой функции только геометрических параметров потока, и силы вязкости не оказывают влияния на величины этих коэффициентов. По данным различных исследователей, это происходит при значениях $Re = 10^4 \dots 10^5$, но величина может быть смещена как в меньшую, так и в большую сторону в зависимости от вида местного сопротивления. По рекомендациям А. Д. Альтшуля, при внезапном расширении и сужении водовода можно считать автомодельными течения, начиная с $Re \geq 10^4$. Для задвижек и тройников, по данным Джона и Роули, начало автомодельной зоны соответствует $Re = 1,4 \cdot 10^4$. Для напорных водоводов гидроэлектростанций А. Г. Кривченко рекомендует с известной осторожностью считать границей автомодельной зоны $Re = 10^5$ [1]. Во всех предыдущих исследованиях местных сопротивлений числа Рейнольдса находятся в диапазоне $1,4 \cdot 10^4 \dots 7,4 \cdot 10^5$ и авторы обосновывают квадратичную область местных сопротивлений и их независимость от сил вязкости. Числа Рейнольдса в экспериментальных исследованиях предлагаемого узла находятся в диапазоне $1,4 \cdot 10^4 \dots 3 \cdot 10^5$.

Было выполнено 510 опытов, в пределах каждой серии постоянной оставалась конструкция узла, варьируемый фактор – напор, шаг изменения которого в среднем составлял 1,8 см. Оценка точности результатов измерений производилась согласно ГОСТ Р ИСО 5725-1–2002, который может применяться для оценки точности измерения свойств жидкостей, что особо значимо для гидравлических экспериментов.

Опыт выполнялся в условиях повторяемости, показатели точности определяли на основании результатов измерений внутри каждой серии. При фиксированном значении фактора определяли размах вариаций показаний по приборам, который сопоставлялся с критическим диапазоном для уровня вероятности 95 % при числе измерений n :

$$CR_{0,95}(n) = f(n)\sigma_r,$$

где σ_r – стандартное отклонение повторяемости; $f(n)$ – коэффициент критического диапазона.

Точность метода измерений вычислялась как сумма общего среднего значения (математического ожидания), лабораторной составляющей систематической погрешности в условиях повторяемости и случайной составляющей погрешности результата измерений в условиях повторяемости [2]. Суммарная предельная относительная ошибка в определении расхода с вероятностью 0,95 составляла 1,1 %, давления – 1,0 %. Оценку точности косвенных измерений выполняли для функции нескольких непосредственно измеряемых величин. Суммарная предельная относительная ошибка опытного значения коэффициента Дарси с вероятностью 0,95 равнялась 4,5 %; суммарная предельная относительная ошибка опытного значения коэффициента местных сопротивлений ζ с вероятностью 0,95 – 4,1 %.

Условия воспроизводимости проверялись сопоставлением экспериментальных данных, полученных в лаборатории, и значений гидравлических параметров по единичным сопротивлениям и схожим сопротивлениям узлов, приведенным в таблице [3].

Экспериментальные исследования показали, что для рассматриваемого узла и входящих в него единичных сопротивлений диапазон чисел Рейнольдса $1,1 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^5$ принадлежит квадратичной области, в которой значение коэффициента ζ зависит только от геометрии местного сопротивления. Коэффициент взаимного влияния плоской двухсторонней задвижки прямоугольного сечения несколько выше, чем односторонней. Взаимное влияние обоих типов задвижек резко прослеживается при небольших степенях их закрытия. Все это обусловлено различиями в формировании ядра скоростей за первым местным сопротивлением и его расположением относительно входа в нишу.

При расчетах пропускной способности равнопроходных тройников исследованной конструкции, работающих только нижней веткой и имеющих

Коэффициенты гидравлических сопротивлений напорных трубопроводов

Гидравлический коэффициент	Справочные данные	Экспериментальные данные авторов
Коэффициент Дарси для квадратных труб, 85×85 мм	По формуле А. Д. Альтшуля: $\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_a}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} = 0,0183...0,0170$ По формуле Г. А. Адамова: $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{e}{1,95} + \frac{3,0}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right) = 0,0201...0,0191$	$\lambda_{\text{эксп}} = 0,0184...0,0169$
Тройник $\alpha = 30^\circ$ с перекрытым ответвлением	Коэффициент сопротивления: по И. Е. Идельчику — 0,03...0,06 по В. Н. Талиеву — 0,03...0,06 по С. И. Левину — 0,03...0,06	0,06
Односторонняя задвижка прямоугольного сечения, $ald = 0,1$ 0,2 0,3 0,4	По данным Б. И. Яньшина: 150×150 мм: 0,17 0,55 1,23 2,43	85×85 мм 0,14 0,53 1,02 2,30
Двухсторонняя задвижка прямоугольного сечения, $ald = 0,1$ 0,2 0,3 0,4	По данным Б. И. Яньшина: 150×150 мм: 0,08 0,36 0,91 1,83	85×85 мм 0,14 0,41 1,09 1,83
Коэффициент взаимного влияния, $ald = 0,1$ 0,2 0,3 0,4	—	0,78/0,78 0,82/0,91 0,98/0,99 0,99/1,04

Примечание: верхние значения соответствуют плоской односторонней задвижке прямоугольного сечения, нижние – плоской двухсторонней задвижке прямоугольного сечения.

регулируемую запорную арматуру перед боковым подводом, необходимо учитывать влияние образующейся ниши. При незначительном коэффициенте собственного сопротивления и достаточно малом угле расположения к оси она тем не менее резко изменяет условия течения за задвижкой, в отдельных случаях приводя к рассеиванию и повторному формированию ядра скоростей. Пренебрежение перекрытой веткой в тройнике и расчет пропускной способности рассмотренного узла как одной магистрали, регулируемого задвижкой, приведет к завышению местного сопротивления до 20 %, причем погрешность будет тем больше, чем меньше перекрыта магистраль.

Связь между коррозионным процессом в элементах трубопровода и величиной коэффициента Кориолиса в соответствующих сечениях была исследована

отраслевой лабораторией судовых систем Калининградского технического института рыбной промышленности и хозяйства Министерства рыбного хозяйства СССР [4]. Свыше 90 % отказов располагалось в так называемых «слабых местах» – в зонах деформации потока местными сопротивлениями. Локализация «слабой зоны» у прямого равнопроходного стального тройника составляет $4,5d$ ниже оси по течению и $1...4d$ выше, в то время как зона влияния в отростках составляет $4d$, в магистрали – $5,5d$. Во всех случаях риск интенсификации коррозии возрастает при расположении сварного шва в пределах зоны влияния местного сопротивления. При регулировании подачи задвижкой, установленной до тройника, зона влияния будет значительно больше. Все это делает существенным

определение длин зоны влияния с целью конструктивного повышения надежности трубопроводов.

Система дифференциальных уравнений, описывающая турбулентное движение жидкости, может быть аналитически решена только для некото-

рых частных случаев, поэтому в программном пакете STAR-CD была реализована численная модель течения в рассматриваемом узле, показавшая хорошее совпадение с экспериментальными данными. Одна из реализаций модели приведена на рис. 2.

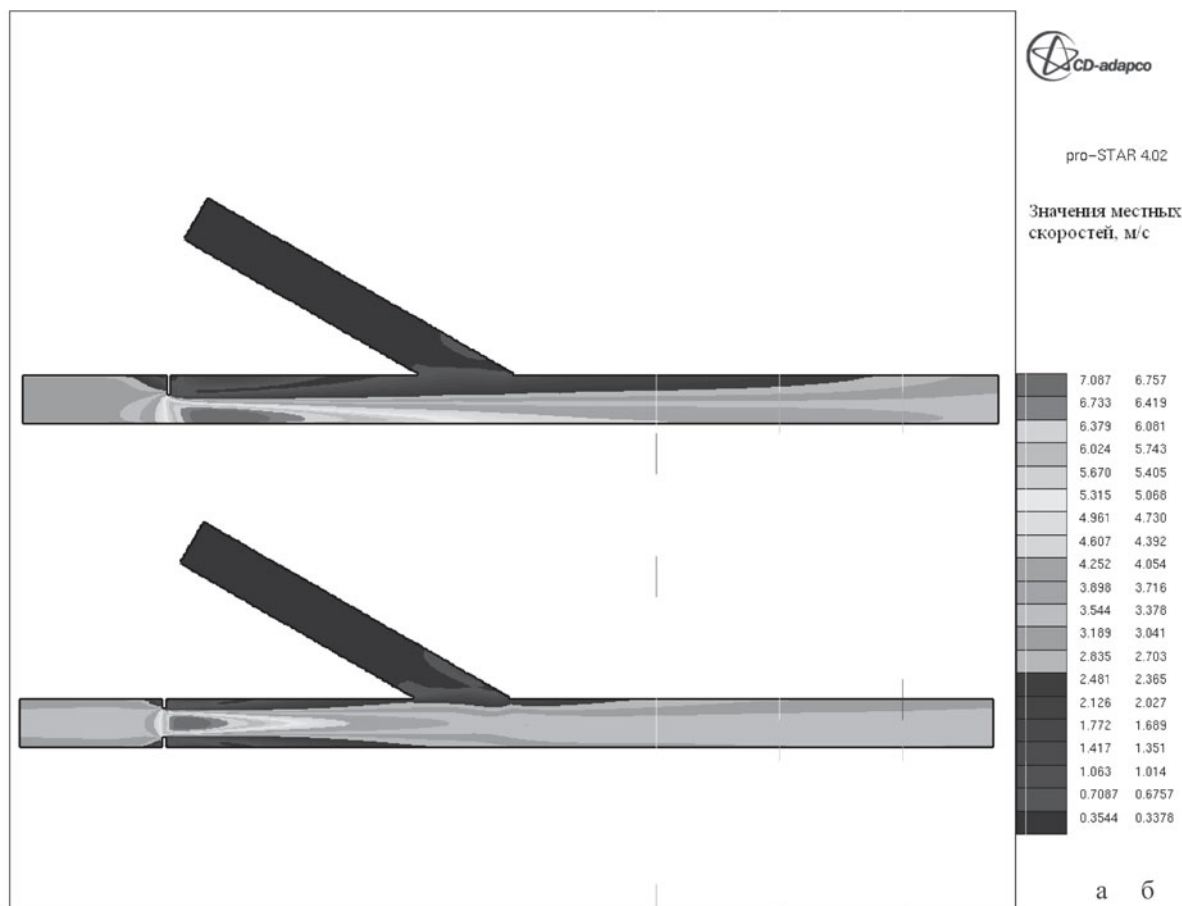


Рис. 2. Скалярные поля скоростей, степень закрытия $a/d = 0,4$: а – односторонняя задвижка прямоугольного сечения; б – двухсторонняя задвижка прямоугольного сечения

Как видим, выброс ядра скоростей на стенки трубопровода при одном и том же открытии происходит для односторонней задвижки на участке $3d$ от оси (нижняя стенка), для двухсторонней – на расстоянии $2d$ (боковая стенка).

В качестве длин влияния для единичных местных сопротивлений, входящих в узел, были приняты положения сечений, в которых коэффициент Кориолиса близок к единице. В процессе исследований учеными были получены их значения в трубах круглого сечения в диапазоне чисел Рейнольдса $1,0...3,5 \cdot 10^5$ [4].

В качестве примера на рис. 3 приведена динамика коэффициента Кориолиса исследуемого узла для числа Рейнольдса $2 \cdot 10^5$ при $Q = 21$ л/с (за начало координат принята ось регулируемой задвижки).

Расчеты показывают, что поток выравнивает свое поле скоростей за односторонней задвижкой на расстоянии от 4 до $14d$ в зависимости от степени закрытия и на расстоянии $3,7...7d$ для регулируемой двухсторонней прямоугольной задвижки. Зона влияния узла во всех рассмотренных случаях больше, чем зона влияния единичного

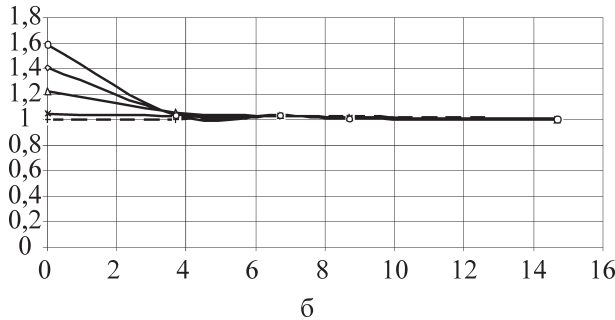
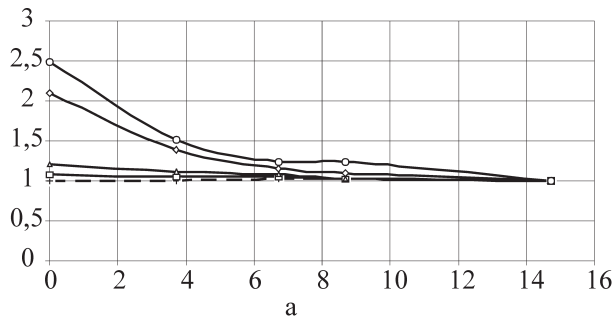


Рис. 3. Изменение коэффициент Кориолиса: а – α -односторонняя задвижка прямоугольного сечения при степени закрытия a/d : —+— транзитный поток; —□— 0,1; —△— 0,2; —◇— 0,3; —○— 0,4; б – α -двухсторонняя задвижка прямоугольного сечения при степени закрытия a/d : —+— транзитный поток; —*— 0,1; —△— 0,2; —◇— 0,3; —○— 0,4

сопротивления. Это вызвано более сильным искажением поля скоростей, при котором поток, не успев стабилизироваться после выхода из первого сопротивления, входит во второе.

Полученные эпюры скоростей и длины участков стабилизации позволили выявить наиболее опасные участ-

ки трубопровода, в которых стенки подвергаются наибольшему гидродинамическому воздействию потока. Если в этих местах невозможно избежать стыков труб, то они должны выполняться с особенной тщательностью и обеспечивать доступ к участку с целью его последующего ремонта.

1. **Кривченко Г.И.** Гидравлические машины. Турбины и насосы: учебник. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 327 с.

2. Точность методов и результатов измерений. – М.: Стандартиформ, 2009. – 292 с.

3. **Идельчик И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 671 с.

4. **Ковалев-Кривоносов П. А., Зюбан В. А., Умбрасас М.-Р. А.** Рекомендации по компоновке отводов и арматуры в составе блоков и агрегатов судовых систем: сб. статей НТО им. А. Н. Крылова. – Вып. 285. – Л.: Судостроение, 1979. – С. 95–100.

Материал поступил в редакцию 10.03.10.

Снежко Вера Леонидовна, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой «Вычислительная техника и прикладная математика»

Тел. 8-909-943-55-33

E-mail: VL_Snejko@mail.ru

Паливец Максим Семенович, аспирант

Тел. 8-926-830-39-99

E-mail: maxim6663@mail.ru