

УДК 676.1+681.121.4

## ВЛИЯНИЕ МЕСТНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА РАБОТУ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ВОДЫ И ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ МАЛЫХ КОНЦЕНТРАЦИЙ

© Ю.Д. Алашкевич, М.С. Лурье, О.М. Лурье, А.С. Фролов\*

*Сибирский государственный университет науки и технологий  
им. М.Ф. Решетнева, пр. Мира, 82, Красноярск, 660049 (Россия),  
e-mail: frolov-a84@mail.ru*

Рассматривается вопрос особенностей эксплуатации погружных вихревых расходомеров воды и водных суспензий малых концентраций в целлюлозно-бумажном производстве, которые установлены в технологических трубопроводах с местными гидравлическими сопротивлениями.

Показано, что при недостаточном прямом участке после местного сопротивления появляется дополнительная погрешность, появляющаяся в итоге влияния местного сопротивления (перехода или отвода) на симметрию эпюры скоростей перед прибором. Данная погрешность возникает вследствие изменения числа Струхала ( $Sh$ ) и связана с методом измерений. Число Струхала начинает зависеть как от расстояния до местного сопротивления, так и от скорости потока жидкости.

Выявлению данной зависимости и посвящена данная работа. Выработаны рекомендации по длине прямых участков трубопроводов перед расходомером, которые могут быть существенно сокращены при ограничении диапазона рабочих скоростей потока.

Исследования проводились методом численного моделирования гидродинамических процессов с последующей обработкой результатов методом планирования эксперимента.

Представлена зависимость числа  $Sh$  от длины относительного диаметра трубопровода  $L'$  для гидродинамического сопротивления в виде перехода. Данная погрешность показывает, что погрешность измерения находится в пределах 2% уже при прямом участке перед расходомером, равном 5–7 диаметрам.

Рассмотрена поверхность отклика для отводов (поворотов) трубопроводов на  $90^\circ$ , из которой следует, что при сохранении длины прямого участка в пределах 5–7 диаметров трубопровода необходимо сужать диапазон измерения приборов в 2.5 раза.

*Ключевые слова:* численное моделирование, переходы, отводы, тело обтекания, вихревые расходомеры, погрешность.

### Введение

Современное целлюлозно-бумажное производство (ЦБП) нельзя представить себе без разветвленной системы трубопроводов, предназначенных для производственных технологических операций, широко охва-

---

*Алашкевич Юрий Давыдович* – заведующий кафедрой машин и аппаратов промышленных технологий, доктор технических наук, профессор, e-mail: mapt@sibgtu.ru

*Лурье Михаил Семенович* – профессор кафедры автоматизации производственных процессов, доктор технических наук, e-mail: m\_o\_l@rambler.ru

*Лурье Ольга Михайловна* – доцент кафедры автоматизации производственных процессов, кандидат технических наук, e-mail: m\_o\_l@rambler.ru

*Фролов Александр Сергеевич* – доцент кафедры автоматизации производственных процессов, кандидат технических наук, e-mail: frolov-a84@mail.ru

ченных автоматизацией, которая во многом определяет качество продукции, позволяет сократить количество потребляемого волокнистого полуфабриката и свежей воды, способствует решению экологических проблем отрасли.

Важнейшим элементом автоматических систем являются датчики расхода (расходомеры) и количества (водосчетчики) [1–3] воды и волокнистых суспензий, циркулирующих в протяженных технологических трубопроводах с различными

---

\* Автор, с которым следует вести переписку.

местными гидродинамическими сопротивлениями (переходами и отводами). Важнейшим условием работы любого расходомера и водосчетчика в плане измерительных характеристик является наличие определенного прямого участка (без местных гидродинамических сопротивлений) трубопровода до прибора и после него. Данный участок измеряется в относительных диаметрах трубопровода ( $L'$ ) и нужен для успокоения потока жидкости и выравнивания эпюры скоростей. Длина такого участка обычно вирируется в пределах  $5 < L' < 20$  и указывается в документации по прибору. Несоблюдение нормы длины прямого участка ведет к возникновению дополнительной погрешности измерения.

В условиях работы предприятий ЦБП и применения на его технологических линиях расходомеров весьма сложным является сочетание требований к длинам прямых участков и габаритов цеха предприятия, особенно при больших диаметрах трубопроводов, используемых в ЦБП. Сокращение длин прямых участков трубопроводов ведет как к сокращению габаритов оборудования, так и к снижению потерь давления в трубопроводах, что снижает потребляемую мощность насосов.

В данной работе с помощью численного моделирования и методов планирования эксперимента принята попытка определения минимальной длины прямых участков перед вихревыми расходомерами с телом обтекания (ТО), исходя из требований к погрешности прибора, которая для коммерческих целей обычно принимается  $\pm 2\%$ .

### Теоретическая часть

Численное моделирование выполнено для трубопроводов с внезапными переходом (сужением) с условным проходом 150–80 мм по ГОСТ 17378–2001 [4] и бесшовным отводом 90 градусов с условным проходом 80 мм ГОСТ 17375–2001 [5]. Выбранный диаметр трубопроводов ( $D$ ) для исследований связан с предположением, что в трубах относительно малого диаметра из-за влияния стенок гидродинамическая картина вокруг ТО получается наиболее сложной и в последствии оказывает существенное влияние на погрешность.

Рассмотрим картину течений потока, формируемую местными гидродинамическими сопротивлениями перед ТО вихревого расходомера. В качестве примера на рисунке 1 изображены структуры потоков для двух типов местных гидродинамических сопротивлений при  $L' = 1D$ .

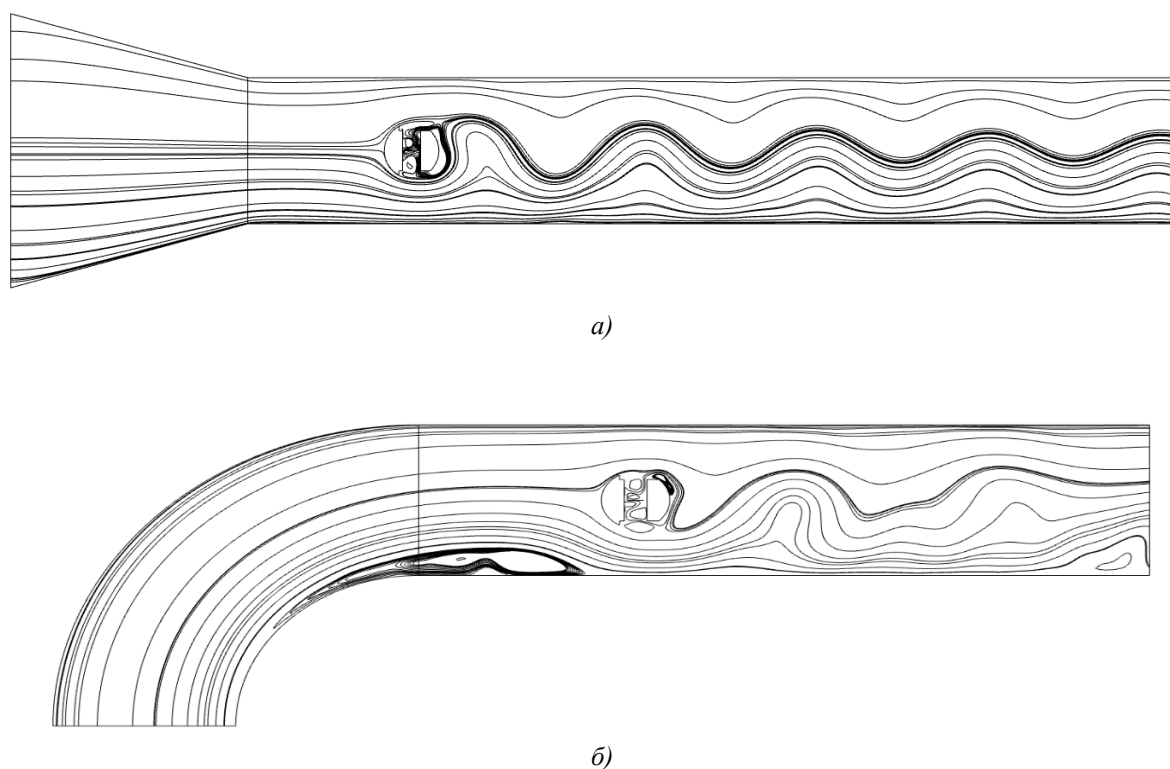


Рис. 1. Структура потока в трубопроводе (линии тока) для двух местных гидродинамических сопротивлений перед ТО вихревого расходомера: *а* – переход 150–80 мм; *б* – отвод 90 градусов

На рисунке 1 визуально видны возмущения, вносимые в поток гидродинамическими сопротивлениями, которые весьма существенно влияют на эпюру скоростей перед ТО вихревого расходомера [6], что напрямую связано с длиной прямого участка перед ним. Как известно, эпюра скоростей ощутимо влияет на измерительные характеристики вихревого расходомера [7].

Показания вихревых расходомеров существенно зависят от симметрии поля скоростей измеряемого потока жидкости, а его изменение приводит к изменению процесса вихреобразования. Возникает дополнительная погрешность, которая не может быть учтена простым расчетным путем. Определение рассматриваемой погрешности может осуществляться на проливных установках или методами численного моделирования.

Проливные установки труднодоступны и работа на них требует больших затрат времени и средств. Поэтому в нашем исследовании для определения изменения профиля скоростей за исследуемым переходом и отводом мы использовали метод численного моделирования гидродинамических процессов с помощью программы Comsol Multiphysics [8]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать самые различные задачи гидродинамики [9], в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течениях различных жидкостей. Например, при моделировании течений в зависимости от чисел Рейнольдса ( $Re$ ) в модели может исследоваться как режим ламинарного течения (Laminar) для ньютоновских и неньютоновских жидкостей, так и различные турбулентные режимы [10, 11] (Turbulent). Поддерживаются несколько моделей турбулентного течения:  $k-\epsilon$ ,  $k-\omega$  и низкорейнольдсовая low  $k-\epsilon$ . Используемые математические модели для моделирования процессов, протекающих в вихревых расходомерах, представлены в работах [12, 13], а анализ их результатов представлен в [14, 15].

При выборе моделей для расчетов мы руководствовались тем, что в отдельных технологических операциях ЦБП концентрация волокнистой суспензии является относительно низкой (до 1%) и транспортируется по трубопроводам с соответствующими скоростями [16]. В то же время в работе Ю.Д. Алашкевича и других авторов [17] показано, что в диспергированном потоке волокнистая суспензия при относительно небольших концентрациях (0.5–1%) может рассматриваться как ньютоновская жидкость, а наличие волокна в жидкости учитывается в модели вводом соответствующего значения плотности и вязкости волокнистой суспензии.

В нашем исследовании на первом этапе использовался встроенный в программу стационарный решатель (*Stationary*), а на втором этапе – решатель, позволяющий исследовать временные процессы (*Time-Dependent*). При этом в зависимости от чисел  $Re$  использовался ламинарный (Laminar) или низкорейнольдсовый (Turbulent, low  $k-\epsilon$ ) режим расчета моделей.

### Экспериментальная часть

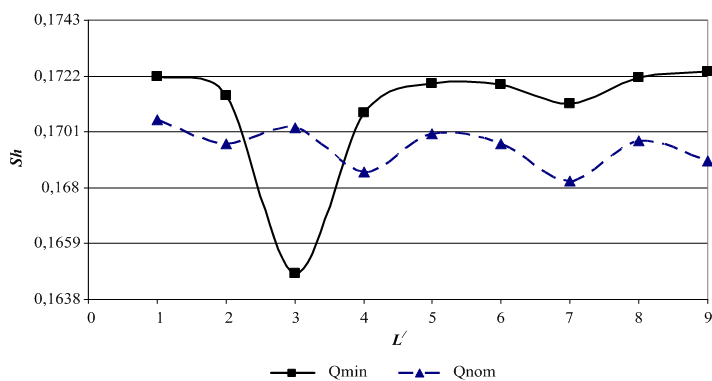
Предварительные исследования показали, что большое влияние на результат моделирования оказывает эпюра скоростей жидкости на входе в измерительный участок расходомера. Поэтому наши исследования были проведены в несколько этапов.

На первом этапе исследования для каждой скорости  $V$  был сформирован установившийся поток жидкости и получены эпюры скоростей потока жидкости на прямом участке трубопровода длиной  $100D$ . На втором этапе исследования моделировался процесс вихреобразования на измерительном участке расходомера совместно с местным гидродинамическим сопротивлением (переходом или отводом).

Длина измерительного участка после гидродинамического сопротивления принималась в соответствии с заданными значениями относительной длины  $L'$ . Значение данного параметра составляло для перехода 150–80 мм от 1 до 9  $L'$  и отвода 90 градусов от 1 до 11  $L'$ . Во всех рассматриваемых случаях после ТО вихревого расходомера брался фиксированный прямой участок равный  $3D$ .

Во всех проводимых исследованиях использовались конструктивные характеристики вихревого расходомера с ТО, описанные ранее в работе [18], а рабочей жидкостью являлась волокнистая суспензия концентрацией 1% с характеристиками, описанными в работе [19].

Результаты эксперимента с переходом 150–80 мм представлены на рисунке 2 в виде графика зависимости числа Струхала ( $Sh$ ) от  $L'$  на скоростях жидкости, соответствующей минимальному ( $Q_{min}$ ) и номинальному ( $Q_{ном}$ ) расходу жидкости.

Рис. 2. График зависимости  $Sh = f(L')$ 

Исследование отвода 90 градусов проводилось с применением метода планирования эксперимента, который был реализован в варианте трехуровневого полного двухфакторного эксперимента по плану, относящемуся к D-оптимальным планам Коно. Планы Коно обладают хорошими статистическими характеристиками и экономны по числу экспериментов [20]. В таблице 1 представлена матрица планирования с входными факторами. Выходным фактором в данном исследовании являлось число Струхалия ( $Sh$ ).

После смоделированного процесса вихреобразования на измерительном участке с отводом 90 градусов проводился расчет поперечного силового воздействия ( $P$ ) на ТО расходомера. Результаты расчета представлены на рисунке 3 в виде графиков для  $L' = 1$  и 6. По полученным данным определялось число  $Sh$ .

Для каждого значения скорости  $V$  определяли частоту первой гармоники процесса вихреобразования  $f$ , по которой согласно (1) находилось число Струхалия ( $Sh$ ) [21, 22]:

$$Sh = f \frac{d}{V}, \quad (1)$$

где  $V$  – средняя скорость потока в сечении трубопровода, в котором установлено тело обтекания, м/с.

Результаты расчета представлены в виде поверхности отклика на рисунке 4.

#### Матрица планирования эксперимента

Входные факторы	Натуральные значения		
	-1	0	+1
Скорость $V$ , м/с	0.1	1.1	2.1
Относительный диаметр трубопровода $L'$	1	6	11

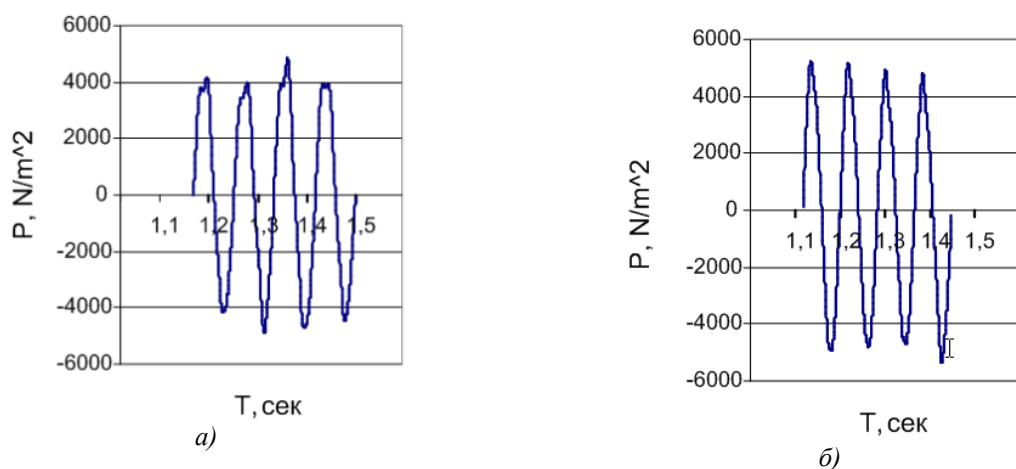


Рис. 3. Графики силового воздействия на ТО вихревого расходомера после отвода 90 градусов: а – при  $L' = 1$ ; б – при  $L' = 6$

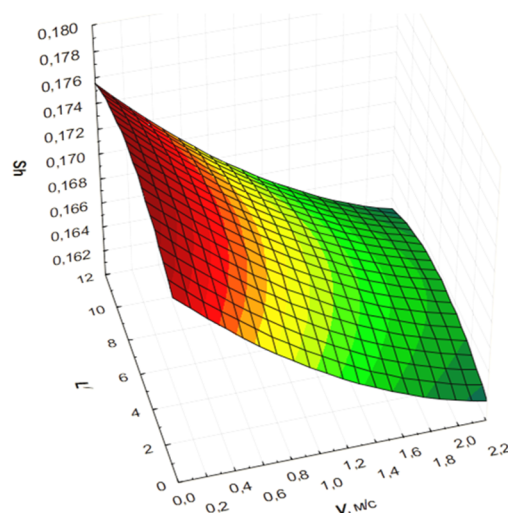


Рис. 4. Зависимость числа Струхали ( $Sh$ ) от относительной длины ( $L'$ ) и скорости потока жидкости ( $V$ ) для отвода  $90^\circ$

Для ТО на каждой исследуемой скорости  $V$  и относительном диаметре трубопровода  $L'$  находим среднее значение числа  $Sh_{cp}$  в рабочем диапазоне ( $0,1 \leq V \leq 1$ ). Отклонение от среднего значения  $\Delta Sh, \%$  определяется из выражения (2). Данные расчетов приведены на рисунке 5.

$$\Delta Sh, \% = \frac{Sh_{cp} - Sh}{Sh_{cp}}. \quad (2)$$

Зависимость  $\Delta Sh, \% = f(L')$  с заданными  $V$  получена также с применением метода планирования эксперимента (рис. 5).

Экспериментально-статистическая регрессионная модель погрешности числа Струхали  $\Delta Sh, \%$  представлена в следующем виде:

$$\Delta Sh, \% = -3.7007 + 5.68 \cdot V - 0.483 \cdot L' - 0.974 \cdot V^2 + 0.0309 \cdot V \cdot L' + 0.037 \cdot L'^2, \quad (3)$$

где  $V$  – скорость потока жидкости, м/с;  $L'$  – относительный диаметр трубопровода.

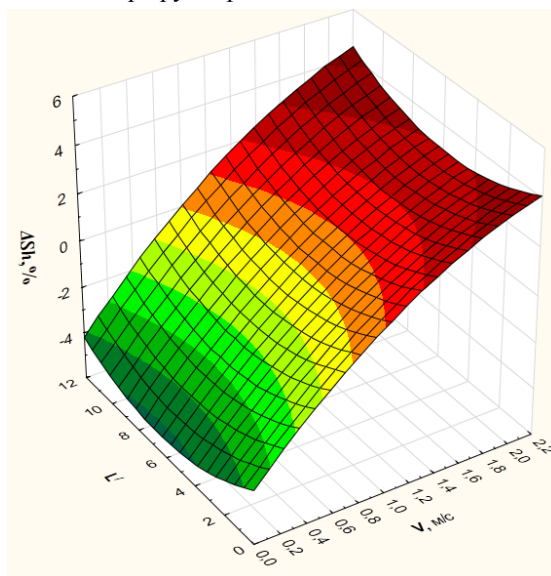


Рис. 5. Зависимость погрешности числа Струхали ( $\Delta Sh, \%$ ) от относительной длины ( $L'$ ) и скорости потока жидкости ( $V$ ) для отвода  $90^\circ$

### Обсуждение результатов

Результат численного моделирования измерительного участка расходомера совместно с местным гидродинамическим сопротивлением в виде перехода 150–80 мм показывает, что погрешность измерения, вызванная наличием в трубопроводе сужения потока, в рабочем диапазоне измерения расходомера находится в

пределах 2%, начиная с относительной длины  $L'=5$ . Таким образом, обеспечив соответствующий прямой участок, можно считать, что во всем диапазоне измерения прибора погрешность, вызванная наличием сужения потока, будет находиться в пределах допустимых значений.

Из результатов численного эксперимента с гидродинамическим сопротивлением в виде отвода 90° (рис. 4) следует, что погрешность измерения расходомера в виде отклонения от среднего значения  $\Delta Sh$ , % в рабочем диапазоне скоростей (расходов) потока суспензии находится в пределах  $\pm 5\%$  даже при максимальном значении относительной длины  $L'=12$ . Это достаточно большая погрешность, которая недопустима как для коммерческих расчетов, так и для средств автоматизации технологических процессов. Ее снижение возможно двумя путями: увеличением длины прямого участка трубопровода (на практике до  $L'=20-25$ ); ограничением диапазона измерения прибора.

Первый способ позволит измерять расходы суспензии с высокой точностью в широком диапазоне скоростей потока, но потребует значительного увеличения длины трубопроводов, возрастут габариты оборудования, возникнут проблемы размещения трубопроводов в заданных помещениях (в особенности при больших диаметрах трубопроводов), увеличатся потери энергии на прокачку суспензии.

Второй способ позволит иметь относительно короткие прямые участки, снизит габариты оборудования, упростит размещение его в заданных производственных помещениях, снизит потери на перекачку суспензий. Но при этом снизится и диапазон измеряемых расходов. Поскольку поверхность отклика на рисунке 5 имеет малую кривизну, то в первом приближении является плоскостью, то есть зависимость между погрешностью измерения и скоростью потока при заданной относительной длине близка к линейной. Так, при  $L'=5$  сужение диапазона измерений в  $5\%/2\%=2.5$  раза обеспечит измерение расхода суспензии с допустимой погрешностью в  $\pm 2\%$ .

Сужение диапазона измерений зачастую не является критичным, так как в реальных технологических процессах расход потока воды или суспензии меняется в относительно небольших пределах, в соответствии с технологическим регламентом.

### **Выводы**

Результаты численного моделирования совместно с методом планирования эксперимента показали, что одним из факторов повышения метрологических характеристик вихревых расходомеров воды и волокнистых суспензий, эксплуатирующихся после местных гидродинамических сопротивлений, является введение обособленных требований к прямому участку перед расходомером. Таким требованием для перехода 150–80 мм можно считать прямой участок, равный 5–7 диаметрам, при котором погрешность измерения находится в пределах 2%, что является допустимым для коммерческих измерений.

Для отводов (поворотов) трубопроводов на 90° при сохранении длины прямого участка в пределах 5–7 диаметров трубопровода необходимо сужать диапазон измерения приборов в 2.5 раза. Например, для расходомера, исследуемого в данной работе, диапазон измерения следует снизить до значений 8–10. Более точно диапазон измерения можно установить, используя полученную модель (3).

Полученные результаты позволяют существенно снизить габариты технологического оборудования в ЦБП и снизить потери энергии в нем (за счет сокращения длины трубопроводов) при использовании расходоизмерительной аппаратуры.

### **Список литературы**

1. Кондрашкова Г.А. Технологические измерения и приборы в целлюлозно-бумажной промышленности: учебник для вузов. М., 1981. 376 с.
2. Вьюков И.Е. Автоматизация технологических процессов целлюлозно-бумажной промышленности: учебное пособие для вузов. М., 1983. 384 с.
3. Фарзана Н.Г., Ильясов Л.В. и др. Технологические измерения и приборы. М., 1998. 449 с.
4. ГОСТ 17378-2001. Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Переходы. Конструкция. Дата введения 2003-01-01. 15 с. Carbom and low-alloy steel butt-welding fitting. Reducers. Design.
5. ГОСТ 17375-2001. Детали трубопроводов бесшовные приварные из углеродистой и низколегированной стали. Отводы кругоизогнутые типа 3D ( $R \approx 1,5 DN$ ). Дата введения 2003-01-01. 15 с. Carbom and low-alloy steel butt-welding fitting/ Sharply curved bends type 3D ( $R \approx 1,5 DN$ ) / Design.
6. Михеев Н.И., Молочников В.М., Кратиров Д.В., Фасхутдинов Р.Э. Подход к устранению влияния местных сопротивлений на структуру потока перед расходомером // Известия РАН. Энергетика. 2008. №5. С. 28–33.

7. Новиков А.И., Зезин В.Г., Шабанов О.Н. Исследования влияния местных сопротивлений на пространственное поле скоростей жидкости в проточной части расходомера и погрешность его показаний // Наука ЮУрГУ: материалы 67-й научной конференции. Секция технических наук. Челябинск, 2015. С. 1518–1526.
8. Шмелев В.Е. Femlab 2.3. Руководство пользователя. М., 1999. 442 с.
9. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М., 1984. 392 с.
10. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. М., 1984. 452 с.
11. Вирц Г. Численные методы в динамике жидкостей / под ред. Г. Вирц, Ж. Смолдена. М., 1981. 408 с.
12. Johnson W., Sproston J.L., Wahed A.E. Numerical Study of Vortex Shedding from Different Shaped Bluff Bodies // Flow Measurement Instruments. 1993. Vol. 4 (4). Pp. 233–240.
13. Hebrard P., Malard L., Strzelecki A. Experimental Study of a Vortex Flowmeter in Pulsatile Flow Conditions // Flow Measurement Instruments. 1992. Vol. 3. Pp. 173–186.
14. Pankanin G.L. Experimental and Theoretical Investigations Concerning the Influence of Stagnation Region on Karman Vortex Shedding // IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference. 2007. Pp. 55–57.
15. Cambier P., Vandemar S., Lavante E.V., Banaszak U., Krisch H., Tournillon S. Numerical and Experimental Study of Effects of Upstream Disturbance on Accuracy of Vortex-Shedding Flow Meter // XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology. 2009. Vol. 1. Pp. 15–18.
16. Чичаев В.А. Оборудование целлюлозно-бумажного производства: в 2 т. Т. 2. Бумагоделательные машины. М., 1981. 264 с.
17. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С., Невзоров А.И., Барановский В.П. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
18. Алашкевич Ю.Д., Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Достоверность мониторинга оборотных вод целлюлозно-бумажного производства с помощью погружных вихревых расходомеров // Химия растительного сырья. 2017. №3. С. 185–191.
19. Ерофеева А.А., Решетова Н.С., Ковалев В.И., Алашкевич Ю.Д. Определение коэффициента динамической вязкости волокнистых суспензий // Химия растительного сырья. 2010. №4. С. 177–182.
20. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics. Красноярск, 2012. 270 с.
21. Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры // Приборы и системы управления. 1971. №1. С. 22–24.
22. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры. М., 1974. 160 с.

*Поступила в редакцию 24 января 2019 г.*

*После переработки 29 мая 2019 г.*

*Принята к публикации 9 июля 2019 г.*

**Для цитирования:** Алашкевич Ю.Д., Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Влияние местных сопротивлений технологических каналов целлюлозно-бумажного производства на работу вихревых расходомеров воды и водных суспензий малых концентраций // Химия растительного сырья. 2019. №3. С. 307–314. DOI: 10.14258/jcprm.2019035113.

*Alashkevich Yu. D., Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S.\* INFLUENCES OF LOCAL RESISTANCES OF TECHNOLOGICAL CHANNELS OF PULP AND PAPER PRODUCTION ON THE OPERATION OF VORTEX FLOW METERS OF WATER AND WATER SUSPENSIONS OF LOW CONCENTRATIONS*

*Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Mira ave., 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia), e-mail: frolov-a84@mail.ru*

The question of the features of operation of submersible vortex flowmeters of water and water suspensions of low concentrations in pulp and paper production, which are installed in process pipelines with local hydraulic resistance, is considered.

It is shown that with an insufficient straight section after local resistance, an additional error appears, which appears due to the influence of local resistance (transition or retraction) on the symmetry of the velocity diagram in front of the device. This error arises due to a change in the Strouhal number (Sh) and is related to the measurement method. The Strouhal number begins to depend on both the distance to the local resistance and the fluid flow rate.

Identify this relationship and is dedicated to this work. Recommendations on the length of straight pipeline sections in front of the flow meter have been developed, which can be significantly reduced by limiting the range of operating flow rates.

---

\* Corresponding author.

The studies were carried out by the method of numerical simulation of hydrodynamic processes with subsequent processing of the results by the method of experiment planning.

The dependence of the number  $Sh$  on the length of the relative diameter of the pipeline  $L/d$  for hydrodynamic resistance in the form of a transition is presented. This error shows that the measurement error is within 2% already with a straight section in front of the flowmeter equal to 5–7 diameters.

The response surface for pipe bends (rotations) is considered at  $90^\circ$  from which it follows that while maintaining the length of the straight section within 5–7 pipe diameters, it is necessary to narrow the measurement range of the instruments 2.5 times.

**Keywords:** numerical simulation, transitions, elbows, body flow, vortex flowmeters, error.

## References

1. Kondrashkova G.A. *Tekhnologicheskiye izmereniya i pribory v tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti*. [Technological measurements and instruments in the pulp and paper industry]. Moscow, 1981, 376 p. (in Russ.).
2. V'yukov I.Ye. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov tsellyulozno-bumazhnoy promyshlennosti*. [Automation of technological processes of the pulp and paper industry]. Moscow, 1983, 384 p. (in Russ.).
3. Farzane N.G., Il'yasov L.V. etc. *Tekhnologicheskiye izmereniya i pribory*. [Technological measurements and devices]. Moscow, 1998, 449 p. (in Russ.).
4. GOST 17378-2001. *Detali truboprovodov besshovnyye privarnyye iz uglerodistoy i nizkolegirovannoy stali. Perekhody. Konstruktsiya*. [State Standard 17378-2001. Carbom and low-alloy steel butt-welding fitting. Reducers. Design]. 2003. 15 p. (in Russ.).
5. GOST 17375-2001. *Detali truboprovodov besshovnyye privarnyye iz uglerodistoy i nizkolegirovannoy stali. Otvody krutoizognutyie tipa 3D ( $R \approx 1,5 DN$ )*. [State Standard 17375-2001. Carbom and low-alloy steel butt-welding fitting/ Sharply curved bends type 3D ( $R \approx 1,5 DN$ )/ Design]. 2003. 15 p. (in Russ.).
6. Mikheyev N.I., Molochnikov V.M., Kratirov D.V., Faskhutdinov R.E. *Izvestiya RAN. Energetika*, 2008, no. 5, pp. 28–33. (in Russ.).
7. Novikov A.I., Zezin V.G., Shabanov O.N. *Nauka YUUrGU: materialy 67-y nauchnoy konferentsii. Sektsiya tekhnicheskikh nauk*. [Science SUSU: materials of the 67th scientific conference. Section of Technical Sciences]. Chelyabinsk, 2015, pp. 1518–1526. (in Russ.).
8. Shmelev V.Ye. *Femlab 2.3. Rukovodstvo pol'zovatelya*. [Femlab 2.3. User's manual]. Moscow, 1999, 442 p. (in Russ.).
9. Lyatkher V.M., Prudovskiy A.M. *Gidravlicheskiye modelirovaniye*. [Hydraulic modeling]. Moscow, 1984, 392 p. (in Russ.).
10. Iyevlev V.M. *Chislennoye modelirovaniye turbulentnykh techeniy*. [Numerical simulation of turbulent flows] Moscow, 1984, 452 p. (in Russ.).
11. Virts G. *Chislennyye metody v dinamike zhidkostey*. [Numerical methods in fluid dynamics]. Ed. G. Wirtz, J. Smolden, Moscow, 1981, 408 p. (in Russ.).
12. Johnson W., Sproston J.L., Wahed A.E. *Flow Measurement Instruments*, 1993, vol. 4(4), pp. 233–240.
13. Hebrard P., Malard L., Strzelecki A. *Flow Measurement Instruments*, 1992, vol. 3, pp. 173–186.
14. Pankanin G.L. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, 2007, pp. 55–57.
15. Cambier P., Vandermar S., Lavante E.V., Banaszak U., Krisch H., Tournillon S. *XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology*, 2009, vol. 1, pp. 15–18.
16. Chichayev V.A. *Oborudovaniye tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 2-kh t. T. 2. Bumagodelatel'nyye mashiny*. [Pulp and paper industry equipment. In 2 vol. Vol. 2. Paper machines.]. Moscow, 1981, 264 p. (in Russ.).
17. Alashkevich YU.D., Reshetova N.S., Nevzorov A.I., Baranovskiy V.P. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri beznozhevoy obrabotke voloknistykh materialov*. [Hydrodynamic phenomena during knifeless processing of fibrous materials]. Krasnoyarsk, 2004, 80 p.
18. Alashkevich YU.D., Lur'ye M.S., Lur'ye O.M., Frolov A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2017, no. 3, pp. 185–191. DOI: 10.14258/jcprm.2017031787 (in Russ.).
19. Yerofeyeva A.A., Reshetova N.S., Kovalev V.I., Alashkevich YU.D. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 4, pp. 177–182. (in Russ.).
20. Pen R.Z. *Planirovaniye eksperimenta v Statgraphics*. [Planning an experiment in Statgraphics]. Krasnoyarsk, 2012, 270 p. (in Russ.).
21. Perel'shteyn M.Ye. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1971, no. 1, pp. 22–24. (in Russ.).
22. Kiyasbeyli A.SH., Perel'shteyn M.Ye. *Vikhrevyye schetchiki-raskhodometry*. [Vortex flow meters]. Moscow, 1974, 160 p. (in Russ.).

Received January 24, 2019

Revised May 29, 2019

Accepted July 9, 2019

**For citing:** Alashkevich Yu. D., Lur'ye M.S., Lur'ye O.M., Frolov A.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 307–314. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2019035113.