

УДК 676.1+681.121.4

ТЕЛА ОБТЕКАНИЯ ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ ДЛЯ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

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

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

Рассматривается вопрос применения вихревых расходомеров с различным исполнением тела обтекания (ТО) в условиях эксплуатации на технологических линиях целлюлозно-бумажного производства.

Показано, что при использовании в вихревых расходомерах различных ТО возникает погрешность в рабочем диапазоне скоростей (расходов). Наблюдаемая погрешность возникает вследствие изменения числа Струхала (Sh) и связана с методом измерения. В данном случае число Струхала начинает зависеть не только от используемого ТО как генератора вихрей, но и от скорости набегающего потока и концентрации волокнистой суспензии. В качестве основного сравнительного фактора для исследуемых ТО было взято силовое воздействие на чувствительный элемент (гибкий электрод), располагающийся внутри ТО.

Исследование было проведено в несколько этапов с применением численного моделирования и метода планирования эксперимента. По результатам численного исследования представлена зависимость числа Струхала (Sh) от скорости потока (V) и концентрации суспензии (c).

В сравнительном анализе по отклонению числа Струхала от средних значений выявлено, что ТО №1 оказывает минимальное влияние концентрации суспензии в рабочем диапазоне скоростей потока ($\pm 0.5\%$). Такое обстоятельство позволяет верить и испытывать расходомеры с такими ТО на обычных проливных установках.

Проведенный анализ ТО по отношению сигнал/шум показывает, что наиболее чистый сигнал вырабатывается цилиндрическим ТО (ТО №3), а ТО №2 и №1 имеют заметно большие шумы. Полученные различия объясняются отсутствием на поверхности цилиндрического ТО лишнего выступов, граней, что приводит к более плавному обтеканию его поверхности потоком суспензии, а также к снижению внутренних паразитных шумов.

Ключевые слова: моделирование, тело обтекания, вихревые расходомеры, анализ, сигнал/шум, погрешность.

Введение

Целлюлозно-бумажная промышленность (ЦБП) является наиболее стратегически и социально значимой отраслью лесопромышленного комплекса России. Она включает в себя различные цепочки производства, такие как выработка целлюлозы, бумаги, картона и изделий из них.

Поскольку данная отрасль отличается высоким потреблением водных ресурсов, то весьма важным является точный учет потребления холодной, горячей воды и технологических жидкостей (волокнистой суспензии различной концентрации) из различных пород древесины на разных стадиях производства.

Одним из современных приборов для измерения расхода воды и волокнистой суспензии в ЦБП могут

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

Лурье Михаил Семенович – доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: m_o_l@rambler.ru

Лурье Ольга Михайловна – кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: m_o_l@rambler.ru

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

служить погружные вихревые расходомеры с кондуктометрическим преобразователем вихревых колебаний (ПВК) [1, 2].

Частота срыва вихрей за телом обтекания (ТО) вихревого расходомера зависит от скорости внешнего потока и поперечного (характерного) размера тела и характеризуется безразмерным параметром – числом Струхала. За ТО возникают пе-

* Автор, с которым следует вести переписку.

риодические вихревые формации, частота вихреобразования которых f в широком диапазоне чисел Рейнольдса (Re) (от $3 \cdot 10^3$ до $250 \cdot 10^3$) строго пропорциональна скорости потока (1) в трубопроводе.

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

где Sh – число Струхала; V – скорость потока в трубопроводе; d – характерный размер ТО.

В кондуктометрических расходомерах датчик частоты вихреобразования представляет собой систему электродов (рис. 1), один из которых гибкий. Гибкий электрод колеблется с частотой вихреобразования под действием перетока жидкости в канале обратной связи (КОС). При этом меняется электрическое сопротивление между электродами, преобразующееся в электрический сигнал, частота которого несет в себе информацию о измеряемом расходе [1].

Форма ТО вихревого расходомера влияет на его метрологические характеристики, стабильность и динамический диапазон измерений. Одной из основных погрешностей связанной с формой ТО является погрешность метода измерения ΔSh , %, как отклонение от среднего значения числа Струхала (Sh) в диапазоне изменения скоростей движения жидкости в трубопроводе [3].

В работах [4–6] были исследованы ряд форм тел обтекания на воде и волокнистой суспензии концентрацией 2%. При этом в сравнительном анализе учитывалось действие набегающего потока на все ТО целиком, что в свою очередь нивелировало анализ действия силового воздействия на чувствительный элемент (гибкий электрод). В нашей работе мы рассматриваем силовое воздействие вихревой формации непосредственно на гибкий электрод – чувствительный элемент ПВК (рис. 2).

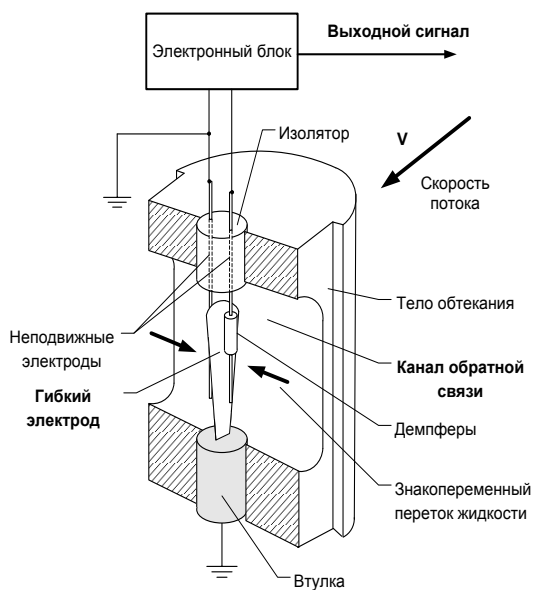


Рис. 1. Кондуктометрический преобразователь вихревых колебаний

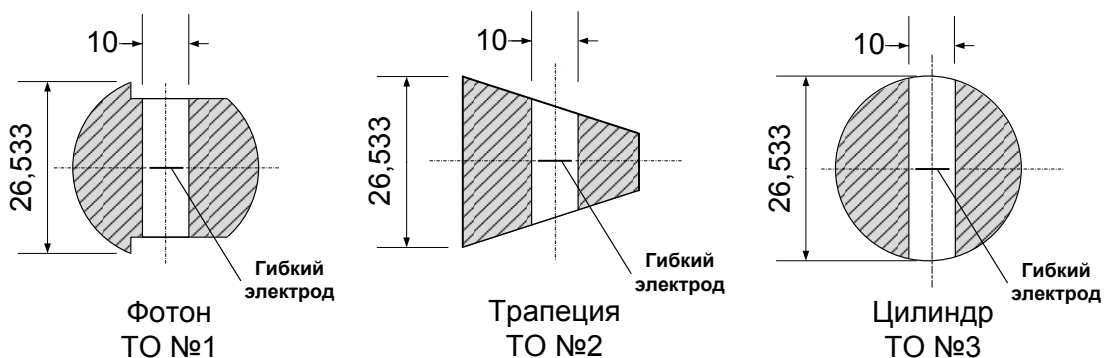


Рис. 2. Исследуемые ТО вихревых расходомеров

В данной работе с помощью методов численного моделирования и планирования эксперимента принята попытка анализа видов ТО, наиболее часто применяющихся в вихревых расходомерах (рис. 2) с целью исследования их метрологических характеристик. При этом все исследуемые ТО рассматриваются в трубопроводе одного диаметра и имеют один характеристический размер.

Теоретическая часть

Для выполнения исследования мы использовали моделирование с помощью программы Comsol Multiphysics. Это мощная интерактивная среда для моделирования и решения научных и технических проблем, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных, поддерживающая конечно-элементную технологию вместе с адаптивным построением сетки и контролем ошибок при работе с различными численными решателями [7]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать самые различные задачи гидродинамики, в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течении различных жидкостей. Подобный подход к решению гидродинамических задач был описан в работе [8–11].

Все исследования ТО проводились с измерительным участком трубопровода диаметром D , равным 80 мм, при скоростях (V), равных 0.11, 0.27 и 0.44 м/с (что соответствует расходам $Q=2.5$ и 8 м³/ч). В качестве параметров исследуемой жидкости была вода и волокнистая суспензия хвойной небеленой целлюлозы (1–2%) при температуре 20 °С. Рассмотрим картину течений потока, создаваемую различными формами ТО в трубопроводе. В качестве примера на рисунке 3 изображены структуры вихревых формаций для скорости 0.27 м/с на воде при температуре 20 °С.

На рисунке 3 визуально видно, что максимальный поперечный размер границ обтекания вместе с отрывной зоной для разных ТО имеет различный характер, а это в свою очередь влияет на частоту срыва вихревой формации.

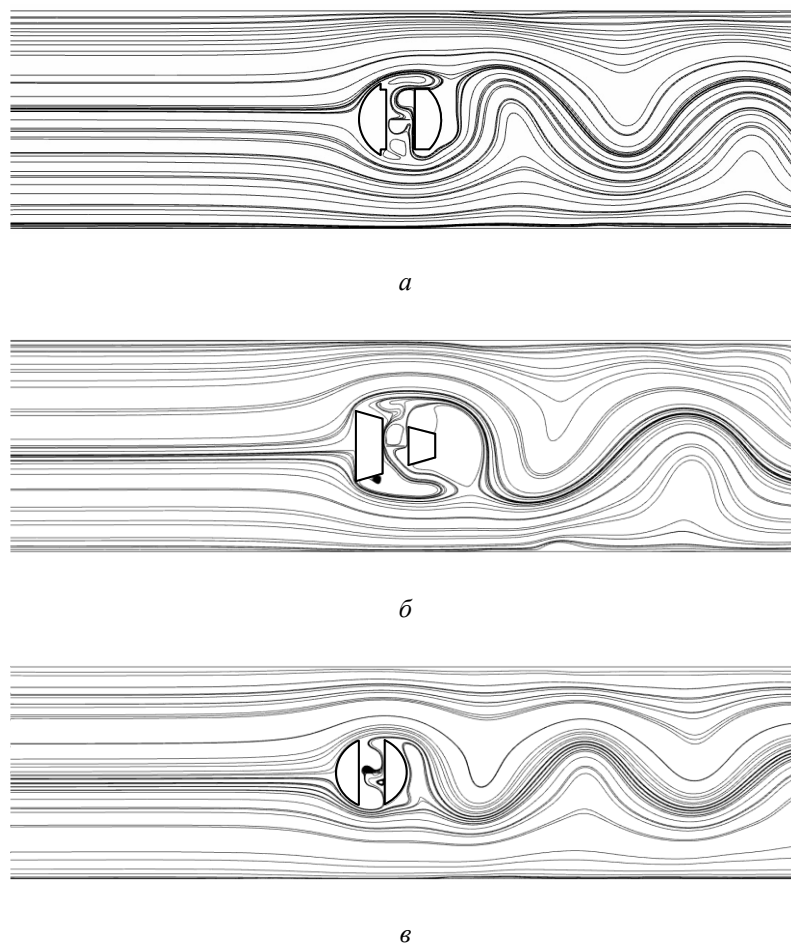


Рис. 3. Линии тока при обтекании потоком жидкости различных ТО: а – ТО №1; б – ТО №2; в – ТО №3

При выборе моделей для расчетов мы руководствовались тем, что в большинстве технологических операций ЦБП концентрация волокна (c , %) (в зависимости от стадии производства) является относительно низкой (до 2%). В то же время в работе Ю.Д. Алашкевича и других авторов [12] показано, что в диспергированном потоке волокнистая суспензия при относительно небольших концентрациях может рассматриваться как ньютоновская жидкость, а наличие волокна [13] в жидкости учитывается путем ввода в модель соответствующего значения 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-ε*) режим расчета моделей. Описание используемых математических моделей, а также их анализ представлен в работах [14–16].

Экспериментальная часть

Предварительные результаты моделирования показали, что на точность моделирования оказывает влияние 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 с исследуемым ТО вихревого расходомера. Длина измерительного участка принималась равной $3D$ до и $3D$ после исследуемого ТО.

Во всех проводимых нами исследованиях использовались параметры чистой воды и волокнистой суспензии концентрацией 1–2% с характеристиками, описанными в работе [17].

Обработка полученных данных проводилась с применением метода планирования эксперимента, который был реализован в варианте трехуровневого полного двухфакторного эксперимента по плану, который относится к D -оптимальным планам Коно. Планы Коно обладают хорошими статистическими характеристиками и экономны по числу экспериментов [18]. В таблице 1 представлена матрица планирования с входными факторами. Выходным фактором в данном исследовании являлось число Струхала (Sh).

Согласно матрице планирования на соответствующей скорости и концентрации путем постпроцессорной обработки были получены графики спектральной плотности мощности силового воздействия усредненного по поверхности чувствительного элемента (гибкого электрода) установленного в ТО (рис. 2). Пример такого графика с пиком основной гармоники и гармониками принимаемыми за шум, показан на рисунке 4 для ТО №2 для чистой воды. На рисунке 4 частота колебаний получена в результате применения частотного анализа, основанного на разложении Фурье [19].

Для каждого значения скорости V определяли первую гармонику процесса вихреобразования f , по которому согласно (1) находилось число Струхала (Sh).

Результаты эксперимента представлены на рисунке 5 в виде поверхностей отклика для разных ТО.

Экспериментально-статистическая регрессионная модель [20] погрешности числа Струхала Sh представлена в следующем виде:

$$\text{для ТО №1:} \quad Sh = 0.1669 + 0.065 \cdot V + 0.0037 \cdot c - 0.0842 \cdot V^2 - 0.0076 \cdot V \cdot c - 0.0003 \cdot c^2 \quad (2)$$

$$\text{для ТО №2:} \quad Sh = 0.1622 - 0.0331 \cdot V + 0.0038 \cdot c - 0.0243 \cdot V^2 + 0.001 \cdot V \cdot c - 0.0008 \cdot c^2 \quad (3)$$

$$\text{для ТО №3:} \quad Sh = 0.2123 + 0.0289 \cdot V + 0.0033 \cdot c + 0.0377 \cdot V^2 - 0.0033 \cdot V \cdot c - 0.0005 \cdot c^2. \quad (4)$$

Отклонение от среднего значения $\Delta Sh, \%$ определяется из выражения (5). Данные расчетов приведены на рисунке 6.

$$\Delta Sh, \% = \frac{Sh_{cp} - Sh}{Sh_{cp}}. \quad (5)$$

Таблица 1. Матрица планирования эксперимента

| Входные факторы | Натуральные значения | | |
|-------------------|----------------------|------|------|
| | -1 | 0 | +1 |
| Скорость V, м/с | 0.11 | 0.27 | 0.44 |
| Концентрация c, % | 0 | 1 | 2 |

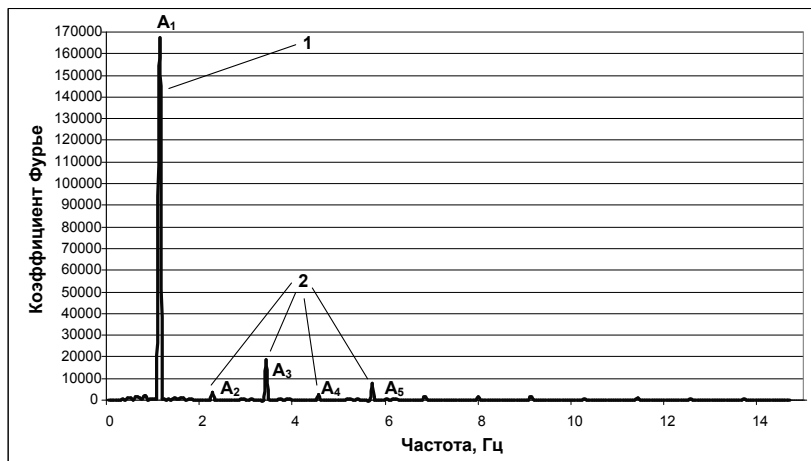


Рис. 4. График спектральной плотности мощности силового воздействия на гибкий электрод ПВК: 1 – основная гармоника; 2 – шум

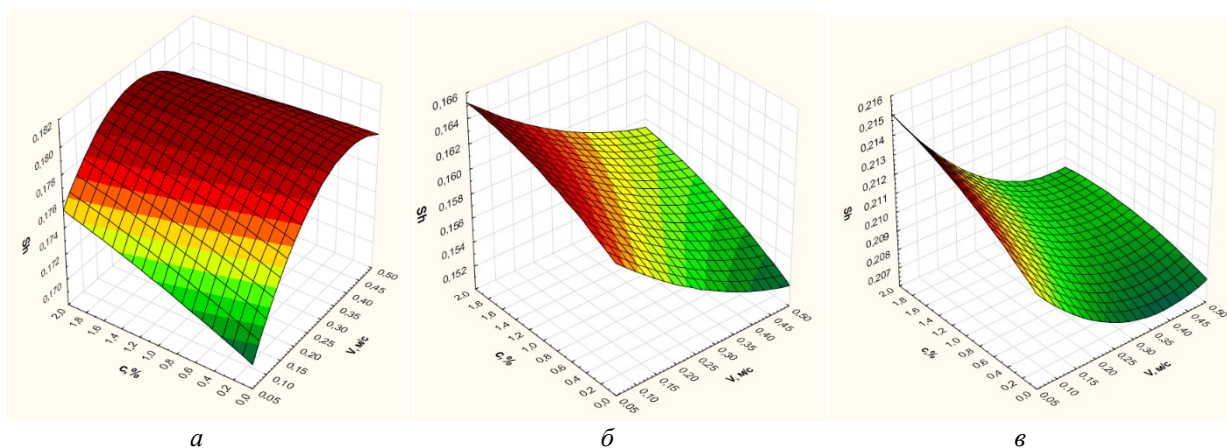


Рис. 5. Зависимость числа Струхалия (*Sh*) от скорости потока (*V*) и концентрации (*c*): а – ТО №1; б – ТО №2; в – ТО №3

Как было показано ранее, помимо первой (основной) A_1 гармоники спектральной плотности мощности (рис. 4) присутствуют также и другие гармоники $A_2...A_n$, которые могут расцениваться как шум. Согласно полученным данным, представляется интересным проанализировать отношение сигнал/шум по выражениям (6, 7) на всех исследуемых ТО, скоростях и концентрациях.

$$A_m = \sqrt{A_2^2 + A_3^2 + A_4^2 \dots A_n^2} \tag{6}$$

$$\text{сигнал/шум} = \frac{A_1}{A_m} \tag{7}$$

Из выражений (7), (8) следует, что искомой величиной является отношение спектральной плотности мощности первой гармоники к эффективной спектральной плотности мощности всех высших гармоник, которые мы считаем шумами. Данные расчетов представлены в таблице 2.

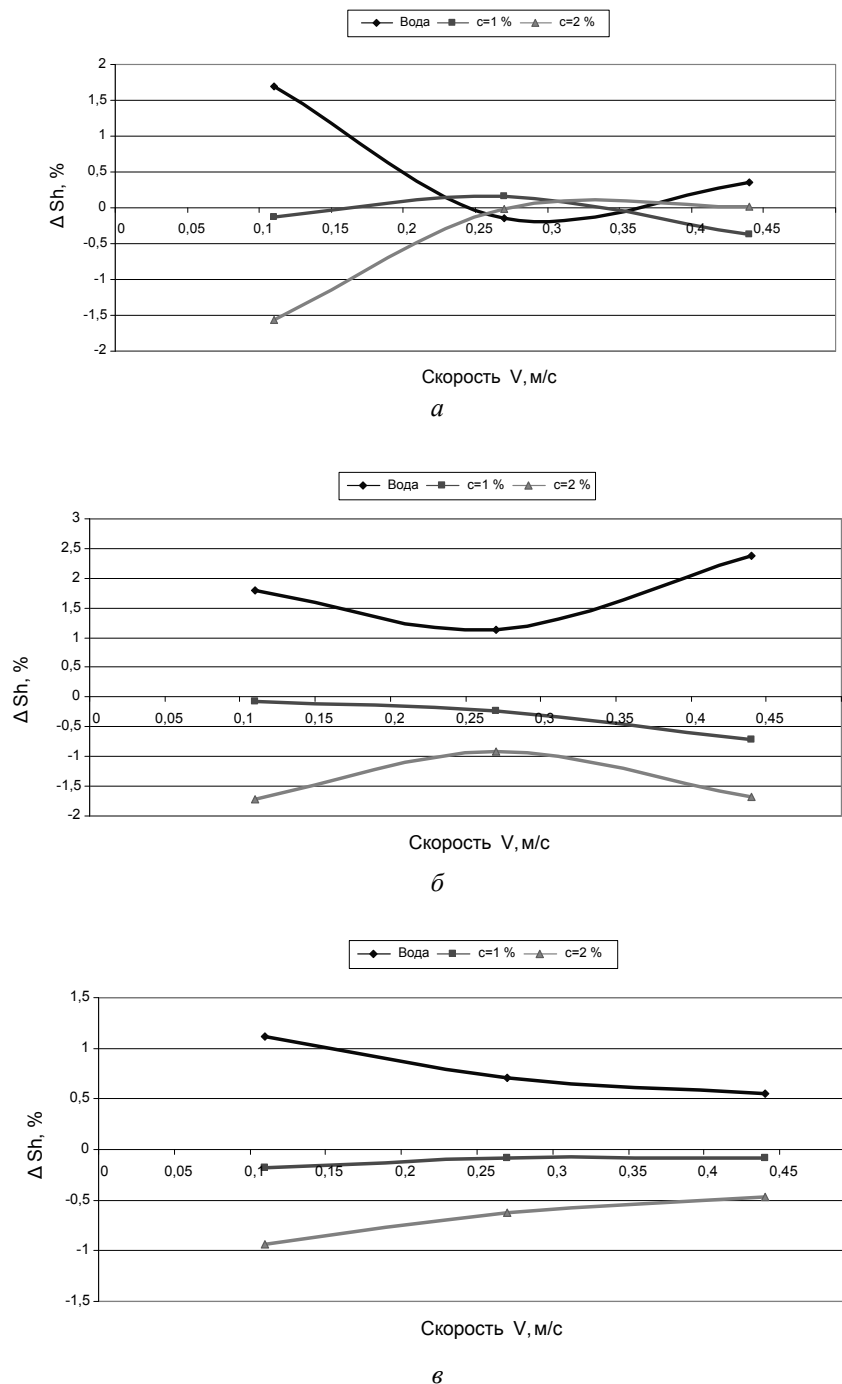
Рис. 6. Зависимость погрешности числа Струхали ($\Delta Sh, \%$) от (V) на различной концентрации (c)

Таблица 2. Результаты расчетов отношения сигнал/шум

| Скорость $V, \text{m/s}$ | ТО №1 | | | ТО №2 | | | ТО №3 | | |
|--------------------------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|----------------------|-------|-------|
| | Концентрация $c, \%$ | | | Концентрация $c, \%$ | | | Концентрация $c, \%$ | | |
| | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 | 0 | 1 | 2 |
| 0.11 | 13.69 | 14.82 | 16.21 | 17.99 | 17.2 | 17.09 | 19.94 | 19.55 | 20.47 |
| 0.27 | 12.37 | 13.8 | 14.69 | 17.72 | 18.5 | 18.16 | 22.02 | 20.96 | 20.13 |
| 0.44 | 12.02 | 12.51 | 13.46 | 17.31 | 18.03 | 18.7 | 21.04 | 21.93 | 21.37 |
| | Децибелы, Дб | | | Децибелы, Дб | | | Децибелы, Дб | | |

Обсуждение результатов

1. В результате численного эксперимента установлено, что число Струхали для всех исследуемых тел обтекания меняется не только в функции скорости потока, но и зависит от концентрации суспензии. При

этом отклонение от среднего значения Струхалю минимально для ТО (в порядке возрастания) №3 (Цилиндр), №1 (Фотон) и №2 (Трапеция). Данное явление объясняется более стабильным положением точки отрыва вихря от поверхности ТО.

Сравнивая отклонение числа Струхалю от средних значений (рис. 6), видим, что для ТО №1 наблюдается минимальное влияние концентрации суспензии на величину ($\pm 0.5\%$) в рабочем диапазоне скоростей потока. Этому способствует наличие четко зафиксированной точки отрыва вихря ступенькой боковой поверхности ТО.

2. Анализируя амплитуды силы, действующей на гибкий электрод, видим, что ее зависимость от скорости потока носит близкий к квадратичному характер, что вполне согласуется с известным положением о теории вихревых структур, образующихся в жидкости [21].

При этом наибольшая амплитуда силового воздействия наблюдается у трапецеидального ТО №2; на втором месте стоит ТО №1 (Фотон) и третьем – ТО №3 (Цилиндр).

Указанное обстоятельство объясняется тем, что на плоской грани трапеции, обращенной навстречу потоку, происходит резкое торможение жидкости, где кинетическая энергия потока наиболее полно переходит в энергию вихревой формации, обеспечивая максимальное силовое воздействие вихря на боковую стенку ТО и гибкий электрод.

3. Исследование величины отношения сигнал/шум для различных ТО позволяет выявить влияние внутренних шумов генерации вихрей расходомера на получаемый сигнал.

Поскольку форма ТО достаточно сложная, то при его обтекании потоком, а также при организации потока внутри канала обратной связи ТО возникает целый спектр паразитных гармоник с частотой отличной от основной частоты вихреобразования. Это придает существенно несинусоидальный характер силовому воздействию на гибкий электрод и осложняет работу измерительного тракта расходомера.

Указанные паразитные гармоники, обусловленные самой формой ТО, мы считаем внутренними шумами, которые и исследовались в данной работе.

В реальных условиях работы расходомера к внутренним шумам добавляются наружные шумы вызванные работой насосов, вибрацией трубопроводов, пульсациями потока и т.д.

Сравнение ТО по отношению сигнал/шум показывает, что наиболее чистый сигнал вырабатывается цилиндрическим ТО (ТО №3), а ТО №2 и №1 имеют заметно большие шумы. Полученные различия объясняются отсутствием на поверхности цилиндрического ТО лишних выступов, граней и т.д., что приводит к более плавному обтеканию его поверхности потоком суспензии, а также к снижению внутренних паразитных шумов.

Выводы

Из проделанного нами анализа следует, что рассмотренные тела обтекания обладают как достоинствами, так и недостатками. Поэтому выбор того или иного ТО для расходомера является всегда компромиссным.

На стабильность числа Струхалю в рабочем диапазоне и минимальному воздействию на него изменения концентрации суспензии лучшими характеристиками обладает ТО №1. Изменение числа Струхалю для него не превышает $\pm 0.5\%$. Данное обстоятельство позволяет поверять и испытывать расходомеры с такими ТО на обычных проливных установках, которые в настоящее время имеются во всех крупных городах при центрах стандартизации и т.д.

Учитывая, что расходомер с ТО №1 имеет меньшее отношение сигнал/шум лишь на 3 дБ, чем приборы с цилиндрическим ТО №3, еще раз убеждаемся в правильности предложенных рекомендаций.

Список литературы

1. Лурье М.С., Лурье О.М. Погружные вихревые расходомеры для целлюлозно-бумажной промышленности // Целлюлоза. Бумага. Картон. 2009. №10. С. 62–66.
2. Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Промышленные расходомеры в целлюлозно-бумажном производстве // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2019. Вып. 227. С. 271–292. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.271-292.
3. Алашкевич Ю.Д., Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Повышение качества мониторинга оборотных и сточных вод целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2018. №4. С. 273–279. DOI: 258/jcrpm.2018044036.

4. Лурье М.С., Лурье О.М. Тела обтекания вихревых расходомеров // Датчики и системы. 2008. №10. С. 21–23.
5. Лурье М.С. Оптимизация тел обтекания вихревых расходомеров для целлюлозно-бумажного производства // Химия растительного сырья. 2010. №4. С. 173–176.
6. Вершинин В.Е., Полковников Ф.И. Численное исследование влияния формы тела обтекания на характеристики потока в вихревых расходомерах // Автоматизация в промышленности. 2016. №1. С. 44–47.
7. Шмелев В.Е. Femlab 2.3. Руководство пользователя. М.: Диалог-МИФИ, 1999. 442 с.
8. Turner J.T., Popiel C.O., Robinson D.I. Evolution of an Improved Vortex Generator // Flow Measurement and Instrumentation. 1993. N4. Pp. 249–259.
9. El Wahed A.K., Johnson M.W., Sproston J.L. Numerical Study of Vortex Shedding from Different Shaped Bluff Bodies // Flow Measurement and Instrumentation. 1993. Vol. 4. N4. Pp. 233–240.
10. Pankanin G.L., Chmielewski R., Berliński J. Analytical Modelling of Karman Vortex Street // Metrology and Measurement Systems. 2005. Vol. XII. N4. Pp. 413–425.
11. Богданов В.Д., Конюхов А.В., Кривоногов А.А., Сафонов Е.В., Дорохов В.А. Использование численных методов моделирования при разработке вихревых расходомеров // Датчики и системы. 2012. №8(159). С. 40–43.
12. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С., Невзоров А.И., Барановский В.П. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
13. 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. 273–279. DOI: 10.14258/jcprm.2019035113.
14. 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.
15. 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.
16. Cambier P., Vandermar 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.
17. 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.
18. Пен Р.З. Статистические методы моделирования и оптимизации процессов целлюлозно-бумажного производства. Красноярск, 1982. 192 с.
19. Зорич В.А. Математический анализ. М.: Физматлит, 1984. 544 с.
20. Холоднов В.А. и др. Математическое моделирование и оптимизация химико-технологических процессов: практическое руководство. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2003. 480 с.
21. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. М.: Дрофа, 2003. 840 с.

Поступила в редакцию 21 марта 2020 г.

После переработки 10 сентября 2020 г.

Принята к публикации 21 сентября 2020 г.

Для цитирования: Алашкевич Ю.Д., Лурье М.С., Лурье О.М., Фролов А.С. Тела обтекания вихревых расходомеров для целлюлозно-бумажной промышленности // Химия растительного сырья. 2020. №4. С. 519–527. DOI: 10.14258/jcprm.2020047574.

Alashkevich Yu.D., Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S.* FLUID FLOW BODIES FOR THE PULP AND PAPER INDUSTRY
Siberian State University of Science and Technology named after academician M.F. Reshetnev, pr. Mira, 82,
Krasnoyarsk, 660037 (Russia), e-mail: frolov-a84@mail.ru

The question of the use of vortex flowmeters with different versions of the flow body (TO) under operating conditions on the technological lines of pulp and paper production is considered.

It is shown that when using different TO in vortex flowmeters, an error occurs in the working range of speeds (flow rates). The observed error arises due to a change in the Strouhal number (Sh) and is associated with the measurement method. In this case, the Strouhal number begins to depend not only on the TO used as a vortex generator, but also on the flow velocity and the concentration of the fibrous suspension. As the main comparative factor for the investigated TOs, the force action on the sensitive element (flexible electrode) located inside the TO was taken.

The study was carried out in several stages using numerical modeling and experimental design method. According to the results of a numerical study, the dependence of the Strouhal number (Sh) on the flow rate (V) and the concentration of the suspension (c) is presented.

In a comparative analysis of the deviation of the Strouhal number from the average values, it was revealed that MOT No. 1 has a minimal effect on the concentration of the suspension in the working range of flow rates ($\pm 0.5\%$). This circumstance makes it possible to verify and test flow meters with such maintenance in conventional pouring installations.

The analysis of the maintenance with respect to the signal-to-noise ratio shows that the purest signal is generated by the cylindrical maintenance (maintenance No. 3), and maintenance No. 2 and No. 1 have noticeably large noise. The differences are explained by the absence on the surface of a cylindrical TO of extra protrusions, faces, which leads to a smoother flow of a suspension around its surface, as well as to a decrease in internal spurious noise.

Keywords: modeling, flow body, vortex flowmeters, analysis, signal / noise, error.

References

1. Lur'ye M.S., Lur'ye O.M. *Tsellyuloza. Bumaga. Karton*, 2009, no. 10, pp. 62–66. (in Russ.).
2. Lur'ye M.S., Lur'ye O.M., Frolov A.S. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoy lesotekhnicheskoy akademii*, 2019, no. 227, pp. 271–292. DOI: 10.21266/2079-4304.2019.227.271-292. (in Russ.).
3. Alashkevich Yu.D., Lur'ye M.S., Lur'ye O.M., Frolov A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 273–279. DOI: 258/jcprm.2018044036. (in Russ.).
4. Lur'ye M.S., Lur'ye O.M. *Datchiki i sistemy*, 2008, no. 10, pp. 21–23. (in Russ.).
5. Lur'ye M.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2010, no. 4, pp. 173–176. (in Russ.).
6. Vershinin V.Ye., Polkovnikov F.I. *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*, 2016, no. 1, pp. 44–47. (in Russ.).
7. Shmelev V.Ye. *Femlab 2.3. Rukovodstvo pol'zovatelya*. [Femlab 2.3. User guide]. Moscow, 1999, 442 p. (in Russ.).
8. Turner J.T., Popiel C.O., Robinson D.I. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1993, no. 4, pp. 249–259.
9. El Wahed A.K., Johnson M.W., Sproston J.L. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1993, vol. 4, no. 4, pp. 233–240.
10. Pankanin G.L., Chmielewski R., Berliński J. *Metrology and Measurement Systems*, 2005, vol. XII, no. 4, pp. 413–425.
11. Bogdanov V.D., Konyukhov A.V., Krivonogov A.A., Safonov Ye.V., Dorokhov V.A. *Datchiki i sistemy*, 2012, no. 8(159), pp. 40–43. (in Russ.).
12. Alashkevich Yu.D., Reshetova N.S., Nevzorov A.I., Baranovskiy V.P. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri beznozhvoy obrabotke voloknistykh materialov*. [Hydrodynamic Phenomena during Bladeless Treatment of Fibrous Materials]. Krasnoyarsk, 2004, 80 p. (in Russ.).
13. Alashkevich Yu.D., Lur'ye M.S., Lur'ye O.M., Frolov A.S. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya*, 2019, no. 3, pp. 273–279. DOI: 10.14258/jcprm.2019035113. (in Russ.).
14. Johnson W., Sproston J.L., Wahed A.E. *Flow Measurement Instruments*, 1993, vol. 4 (4), pp. 233–240.
15. Hebrard P., Malard L., Strzelecki A. *Flow Measurement Instruments*, 1992, vol. 3, pp. 173–186.
16. 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.
17. 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.).
18. Pen R.Z. *Statisticheskiye metody modelirovaniya i optimizatsii protsessov tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva*. [Statistical methods for modeling and optimization of pulp and paper production processes]. Krasnoyarsk, 1982, 192 p. (in Russ.).
19. Zorich V.A. *Matematicheskii analiz*. [Mathematical analysis]. Moscow, 1984, 544 p. (in Russ.).
20. Kholodnov V.A. i dr. *Matematicheskoye modelirovaniye i optimizatsiya khimiko-tehnologicheskikh protsessov: prakticheskoye rukovodstvo*. [Mathematical modeling and optimization of chemical-technological processes: a practical guide]. St.-Petersburg, 2003, 480 p. (in Russ.).
21. Loytsyanskiy L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza: ucheb. dlya vuzov*. [Mechanics of liquid and gas: textbook. for universities]. Moscow, 2003, 840 p. (in Russ.).

Received March 21, 2020

Revised September 10, 2020

Accepted September 21, 2020

For citing: Alashkevich Yu.D., Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2020, no. 4, pp. 519–527. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2020047574.

* Corresponding author.

