

УДК 676.1+681.121.4

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА МОНИТОРИНГА ОБОРОТНЫХ И СТОЧНЫХ ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

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

Рассматривается вопрос особенностей эксплуатации погружных вихревых расходомеров, применяемых в системах мониторинга оборотных и сточных вод целлюлозно-бумажного производства.

Показано, что при ошибке монтажа данных приборов может появляться дополнительная погрешность, появляющаяся вследствие угла между осью тела обтекания (ТО) расходомера и осью трубопровода. Данная погрешность связана с методом измерения, которая в свою очередь ведет к изменению числа Струхала (Sh). Влияние данной погрешности приводит к изменению геометрии проточной части погружного расходомера (появление угла β), что способствует изменению процесса вихреобразования.

Рассмотрены варианты нахождения данной погрешности из которых был выбран метод численного моделирования гидродинамических процессов с последующей обработкой методом планирования эксперимента. Для каждой исследуемой скорости волокнистой суспензии и угле отклонения оси ТО был получен график частотного спектра процесса вихреобразования на ТО, который впоследствии использовался для нахождения числа Sh.

Представлена зависимость погрешности монтажа $\Delta Sh, \%$ в виде поверхности отклика. Выявлено, что погрешность монтажа ТО, которая оценивается углом β , является относительно небольшой и изменяется с увеличением β линейно. Если принять в качестве допустимой величины угла $\beta = \pm 3^\circ$, то погрешность измерения расхода суспензии не будет превосходить 0,25% во всем диапазоне рассматриваемых скоростей.

Ключевые слова: численное моделирование, сточные и оборотные воды, тело обтекания, вихревые расходомеры, погрешности монтажа.

Введение

Экологические и экономические проблемы, связанные с производственной деятельностью предприятий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) невозможно решить без осуществления мониторинга оборотных и сточных вод попадающих в соседние с предприятием водоемы.

Поскольку все производства отрасли ЦБП многотонажные, то расходы оборотных и сточных вод

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

(в зависимости от стадии производства) могут измеряться десятками и тысячами тонн воды в час [1]. Завышенные объемы стоков в значительной степени обусловлены невысокой культурой производства, низкой степенью использования оборотных вод на предприятиях ЦБП [2].

Основным параметром качественного мониторинга является достоверность измерения объемов сточных и оборотных вод с помощью расходоизмерительного оборудования (расходомеры и водосчет-

* Автор, с которым следует вести переписку.

чки). Данный параметр зависит от многих факторов, в том числе от погрешности монтажа прибора на рабочем технологическом трубопроводе.

В данной работе с помощью численного моделирования и методов планирования эксперимента предпринята попытка определения величин допусков на погрешность монтажа связанную с неперпендикулярностью характерного размера тела обтекания (ТО) и оси трубопровода при различных расходах измеряемой жидкости. Подобные исследования мы описывали в работе [3], но они были выполнены лишь для одной скорости жидкости в трубопроводе. Такой же подход был показан в работе [4] при моделировании вихревой дорожки Кармана [5], а в работе [6] – применительно к вихревым расходомерам.

Теоретическая часть

Численное моделирование выполнено для трубопроводов с условным проходом 80 мм, потому как в трубопроводе малого диаметра из-за влияния стенок гидродинамическая картина вокруг ТО получается наиболее сложной и влияние погрешности монтажа проявляется в наибольшей степени.

Проанализируем погрешность монтажа [7], связанную с неперпендикулярностью характерного размера ТО и оси трубопровода (рис. 1а).

Рассмотрим ТО [8], изображенное на рисунке 1б. Если при проектировании ТО угол α выбран таким, чтобы во всем диапазоне скоростей потока срыв вихревой формации с поверхности ТО происходил на острых гранях А–А, то характерный размер ТО, определяющий частоту вихреобразования, равен d . В случае если плоскость А–А не перпендикулярна оси трубопровода и вектору скорости жидкости V , как показано на рисунке 1в, то размер d изменится до значения d' .

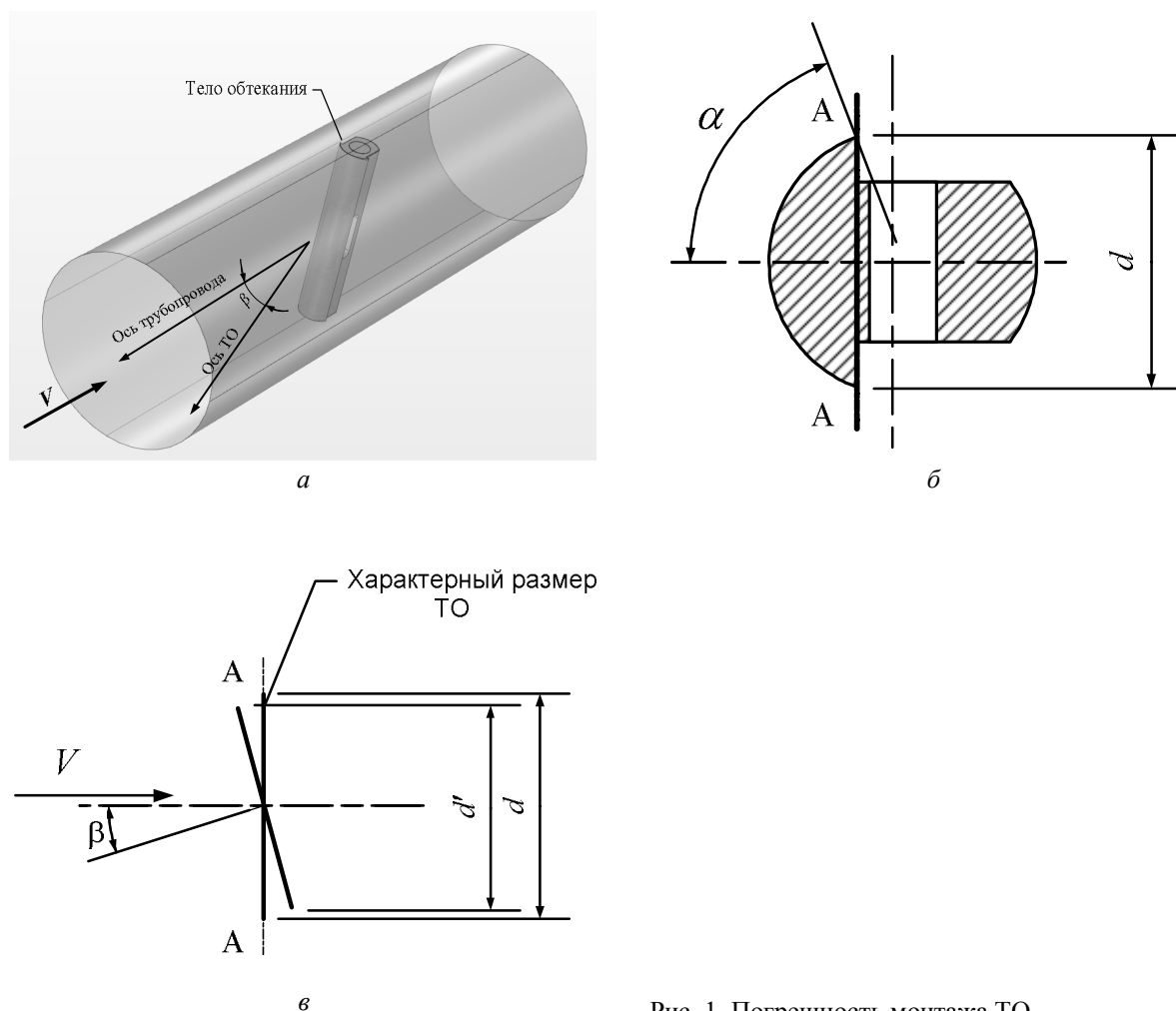


Рис. 1. Погрешность монтажа ТО

При этом относительное изменение характерного размера тела обтекания преобразователя $\Delta 1\%$ будет равно

$$\Delta 1\% = \frac{d-d'}{d} 100\% = (1 - \cos \beta) \cdot 100\% , \quad (1)$$

где β – угол между осью трубопровода и нормалью к плоскости А–А, характеризующий неперпендикулярность характерного размера ТО и оси трубопровода, град.

Изменение геометрии проточной части погружного расходомера (появление угла β) приводит и к изменению процесса вихреобразования. Возникает дополнительная погрешность, которая называется гидродинамической составляющей погрешности. Она не может быть учтена простым расчетным путем. Определение гидродинамической составляющей 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 мы использовали метод численного моделирования гидродинамических процессов с помощью программы Comsol Multiphysics [9]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать самые различные задачи гидродинамики [10], в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течении различных жидкостей. Например, при моделировании течений в зависимости от чисел Рейнольдса в модели может исследоваться как режим ламинарного течения (Laminar) для ньютоновских и неньютоновских жидкостей, так и различные турбулентные режимы [11, 12] (Turbulent). Поддерживаются несколько моделей турбулентного течения: $k-\epsilon$, $k-\omega$ и низкорейнольдсовая low $k-\epsilon$.

При выборе моделей для расчетов мы руководствовались тем, что в оборотных водах концентрация волокнистой суспензии (в зависимости от стадии производства) является относительно низкой (до 1%) и транспортируется по трубопроводам с соответствующими скоростями [13]. В то же время в работе Ю.Д. Алашкевича и других авторов [14] 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 вязкости жидкости.

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 мы проводили исследования в несколько этапов.

На первом этапе для каждой скорости V , соответствующей определенному числу Re в исследуемом диапазоне, был сформирован установившийся поток жидкости и получены эпюры скоростей потока жидкости на прямом участке трубопровода длиной $100D$ (D – диаметр трубопровода).

На втором этапе исследования моделировался процесс вихреобразования на измерительном участке расходомера. Длина измерительного участка принималась равной $6D$ посередине, которого устанавливалось ТО. Сформированная эпюра скоростей на первом этапе исследования передавалась на вход измерительного участка и проводился дальнейший расчет.

В исследуемой модели рабочей жидкостью являлась волокнистая суспензия концентрацией 1% с характеристиками, описанными в работе [15].

Дальнейшая обработка эксперимента 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 [16, 17]. В таблице 1 представлена матрица планирования с входными факторами. Выходным фактором в данном исследовании являлось число Струхала (Sh).

Для ТО на каждой исследуемой скорости V и угле отклонения оси путем постпроцессорной обработки были получены графики частотного спектра процесса вихреобразования f усредненного по боковой проекции ТО. Пример такого графика показан на рисунке 2.

Матрица планирования

Входные факторы	Натуральные значения		
	-1	0	+1
Скорость V , м/с	0,1	0,3	0,5
Угол поворот оси ТО, °	0	2	4

Для каждого значения скорости V определяли первую гармонику процесса вихреобразования f , по которому согласно (1) находилось число Струхала (Sh) [18, 19]:

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

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

Для ТО на каждой исследуемой скорости V и угле отклонения оси находим среднее значение числа Sh_{cp} в рабочем диапазоне ($0,1 \leq V \leq 0,5$). Отклонение от среднего значения $\Delta Sh, \%$ определяется из выражения (2). Данные расчетов приведены на рисунке 3.

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

Зависимость $\Delta Sh, \% = f(V)$ с углом отклонения ТО от оси трубопровода (от 0 до 4 градусов) получена также с применением метода планирования эксперимента (рис. 3).

Экспериментально-статистические модели изменения числа $\Delta Sh, \%$ представлены в виде следующей регрессионной модели:

$$\Delta Sh, \% = -4,18 + 21,13 \cdot V + 0,14 \cdot \beta - 19,7933 \cdot V^2 + 0,439 \cdot V \cdot \beta - 0,066 \cdot \beta^2, \quad (3)$$

где V – скорость жидкости, м/с; β – угол поворота ТО.

Для установления зависимости погрешности прибора от угла поворота ТО возьмем первую производную по скорости V из выражения (3). При заданном значении $V = \text{const}$ получаем уравнение (4)

$$\Delta Sh, \%(\beta) = 0,1464 + 0,439 \cdot V - 0,132 \cdot \beta \quad (4)$$

На рисунке 4 представлен расчет погрешности по уравнению (4) для различных значений V .

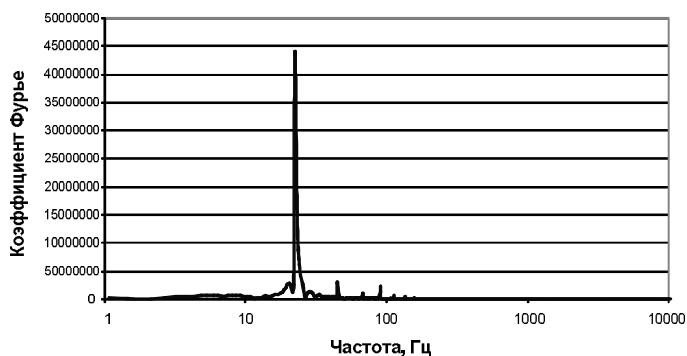


Рис. 2. График частотного спектра процесса вихреобразования на ТО

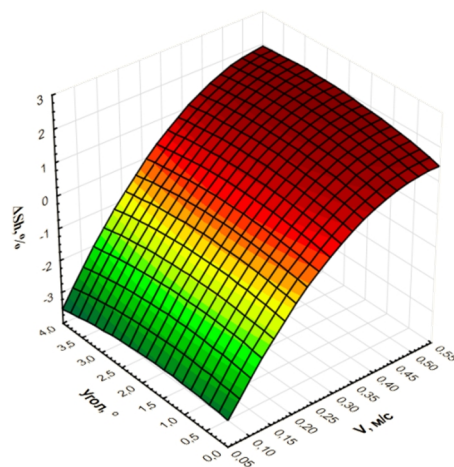


Рис. 3. Зависимость числа $\Delta Sh, \% = f(V)$ и градуса отклонения ТО

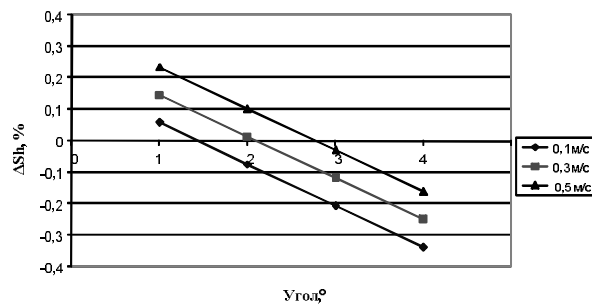


Рис. 4. Зависимость погрешности числа Струхала (ΔSh , %) от угла отклонения оси ТО и от оси трубопровода (β)

Обсуждение результатов

Из результатов численного эксперимента и исследования двухфакторной модели методом планирования эксперимента следует, что погрешность измерения на малых скоростях потока суспензии (до 0,5 м/с, что соответствует 25% от номинального диапазона измерений) в основном определяется скоростью потока и в меньшей степени – погрешностью монтажа прибора.

Значительное влияние скорости потока на погрешность измерения определяется тем, что в области малых скоростей вихреобразование недостаточно устойчиво, что проявляется в изменении числа Струхала. На малых скоростях потока срыв вихревой формации может происходить до острой кромки ТО (рис. 1б), при этом увеличивается число Струхала, что также показано в работе [20] для других форм ТО с острой кромкой. С ростом скорости точки отрыва потока перемещаются по ТО назад и фиксируются на заостренной кромке ТО, поэтому с ростом скорости потока суспензии относительное изменение числа Струхала, а значит, и погрешности измерения снижаются.

Погрешность, вызванная неточностью монтажа ТО, которую можно оценить углом β , является относительно небольшой и изменяется с увеличением β линейно. Если принять в качестве допустимой величины угла $\beta = \pm 3^\circ$, то погрешность измерения расхода суспензии не будет превосходить 0,25% во всем диапазоне рассматриваемых скоростей.

Относительно небольшая величина данной погрешности объясняется тем, что она в основном вызвана изменением характерного размера ТО при его повороте, как показано на рисунке 1в. Данное изменение при рассматриваемых углах невелико, что и определяет значения данной погрешности измерения.

Таким образом, $\beta = \pm 3^\circ$ можно считать предельно допустимым углом при установке расходомера на технологический трубопровод.

Выводы

Результаты численного моделирования совместно с методом планирования эксперимента показали, что одним из факторов повышения качества мониторинга оборотных и сточных вод ЦБП является введение обоснованных норм допуска при монтаже погружных вихревых расходомеров и водосчетчиков на технологические трубопроводы. Такой нормой можно считать угол отклонения оси ТО от оси трубопровода, не превышающий $\pm 3^\circ$. Это обеспечивает дополнительную погрешность измерения не более 0,25%, что примерно в 5-8 раз ниже, чем допустимая погрешность для коммерческих измерений.

Список литературы

1. Личутина Т.Ф., Мискевич И.В., Бровко О.С., Гусакова М.А. Оптимизация нормирования сброса стоков предприятий ЦБП в водотоки. Екатеринбург, 2005. 212 с.
2. Гермер Э.И. Современная концепция экологического нормирования технологических процессов ЦБП и возможные пути ее реализации в России. О проекте новой системы экологического нормирования – предпосылки его появления и концептуальные решения; проблемы, оставшиеся за рамками проекта // Лесной журнал. 2008. №2. С. 107–116.
3. 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.
4. Pankanin G.L, Berlinski J., Chmielewski R. Simulation of Karman Vortex Street Development Using New Model // Metrology & Measurement Systems. 2006. Vol. 13. Pp. 35–47.

5. Karman Th.V. Flüssigkeits- und löfwtwiderstand // Physikalische Zeitschrift. 1912. Bd. 13. S. 55.
6. Богданов В.Д., Конохов 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.
7. Лурье М.С., Лурье О.М. Погрешности погружных вихревых расходомеров и методы их снижения // Датчики и системы. 2012. №1. С. 25–29.
8. Лурье М.С., Лурье О.М. Тела обтекания вихревых расходомеров // Датчики и системы. 2008. №10. С. 21–23.
9. Шмелев В.Е. Femlab 2.3. Руководство пользователя. М., 1999. 442 с.
10. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М., 1984. 392 с.
11. Иевлев В.М. Численное моделирование турбулентных течений. М., 1984. 452 с.
12. Вирц Г. Численные методы в динамике жидкостей. М., 1981. 408 с.
13. Чичаев В.А., Васильев А.А., Васильев И.А. и др. Оборудование целлюлозно-бумажного производства: в 2 т. Т. 2. Бумагоделательные машины. М., 1981. 264 с.
14. Алашкевич Ю.Д., Решетова Н.С., Невзоров А.И., Барановский В.П. Гидродинамические явления при безножевой обработке волокнистых материалов. Красноярск, 2004. 80 с.
15. 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.
16. Пен Р.З. Планирование эксперимента в Statgraphics. Красноярск, 2012. 270 с.
17. Алексахин С.В., Балдин А.В., Криницин В.В. и др. Прикладной статистический анализ данных. М., 1998. 352 с.
18. Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры // Приборы и системы управления. 1971. №1. С. 22–24.
19. Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е. Вихревые счетчики-расходомеры. М., 1974. 160 с.
20. Ford C.L., Winroth P.M. and Alfredsson P.H. Vortex-meter Design: The Influence of Shedding-body Geometry on Shedding Characteristics // Flow Measurement and Instrumentation. 2018. Vol. 59. Pp. 88–102. URL: <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2017.12.004>.

Поступила в редакцию 26 апреля 2018 г.

После переработки 8 августа 2018 г.

Принята к публикации 1 сентября 2018 г.

Для цитирования: 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: 10.14258/jcrpm.2018044036.

Alashkevich Yu.D., Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S. IMPROVING THE QUALITY OF MONITORING OF CIRCULATING AND WASTE WATERS OF PULP AND PAPER PRODUCTION*

*M.F. Reshetnev Siberian State Aerospace University, Mira ave., 82, Krasnoyarsk, 660049 (Russia),
e-mail: frolov-a84@mail.ru*

The issue of operation of submersible vortex flowmeters used in the systems of monitoring of circulating and waste waters of pulp and paper production is considered.

It is shown that in the event of an error in the installation of these instruments, an additional error appears due to the angle between the axis of the flow body (TO) of the flowmeter and the axis of the pipeline. This error is related to the measurement method, which in turn leads to a change in the Strouhal number (Sh). The influence of this error leads to a change in the geometry of the flow part of the submerged flowmeter (the appearance of the angle β), which in turn leads to a change in the vortex formation process.

Variants of finding this error are considered, from which the method of numerical modeling of hydrodynamic processes with subsequent processing by the method of experiment planning was chosen. For each investigated velocity of the fiber suspension and the angle of deflection of the TO axis, a graph of the frequency spectrum of the vortex formation process was obtained. Which was later used to find the number Sh.

The dependence of the installation error $\Delta Sh, \%$ is presented. in the form of a response surface. It is revealed that the error in the installation of the TO, which is estimated by the angle β , is relatively small and varies linearly with increasing β . If the angle $\beta = \pm 3^\circ$ is accepted as an allowable value, then the error in measuring the flow rate of the suspension will not exceed 0.25% over the entire range of velocities under consideration.

Keywords: numerical simulation, sewage and circulating water, flow body, vortex flowmeters, installation errors.

* Corresponding author.

References

1. Lichutina T.F., Miskevich I.V., Brovko O.S., Gusakova M.A. *Optimizatsiya normirovaniya sbrosa stokov predpriyatiy TSBP v vodotok*. Optimization of rationing of wastewater from pulp and paper enterprises of enterprises of the pulp and paper industry. [Yekaterinburg], 2005, 212 p. (in Russ.).
2. Germer E.I. *Lesnoy zhurnal*, 2008, no. 2, pp. 107–116. (in Russ.).
3. 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. (in Russ.).
4. Pankanin G.L., Berlinski J., Chmielewski R. *Metrology & Measurment Systems*, 2006, vol. 13, pp. 35–47.
5. Karman Th.V. *Physikalische Zeitschrift*, 1912, bd. 13, s. 55. (in German).
6. 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.).
7. Lur'ye M.S., Lur'ye O.M. *Datchiki i sistemy*, 2012, no. 1, pp. 25–29. (in Russ.).
8. Lur'ye M.S., Lur'ye O.M. *Datchiki i sistemy*, 2008, no. 10, pp. 21–23. (in Russ.).
9. Shmelev V.Ye. *Femlab 2.3. Rukovodstvo pol'zovatelya*. [Femlab 2.3. User's manual]. Moscow, 1999, 442 p. (in Russ.).
10. Lyatkher V.M., Prudovskiy A.M. *Gidravlicheskiye modelirovaniye*. [Hydraulic modeling]. Moscow, 1984, 392 p. (in Russ.).
11. Iyevlev V.M. *Chislennoye modelirovaniye turbulentykh techeniy*. [Numerical simulation of turbulent flows]. Moscow, 1984, 452 p. (in Russ.).
12. Virts G. *Chislenkiye metody v dinamike zhidkostey*. [Numerical methods in fluid dynamics]. Moscow, 1981, 408 p. (in Russ.).
13. Chichayev V.A., Vasil'yev A.A., Vasil'yev I.A. et al. *Oborudovaniye tsellyulozno-bumazhnogo proizvodstva. V 2-kh tomakh. T. 2. Bumagodelatel'nyye mashiny*. [Equipment for pulp and paper production. In 2 volumes. Vol. 2. Paper machines.]. Moscow, 1981, 264 p. (in Russ.).
14. Alashkevich YU.D., Reshetova N.S., Nevzorov A.I., Baranovskiy V.P. *Gidrodinamicheskiye yavleniya pri beznozhvoy obrabotke voloknistykh materialov*. [Hydrodynamic phenomena in the non-chewing treatment of fibrous materials]. Krasnoyarsk, 2004, 80 p. (in Russ.).
15. 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.).
16. Pen R.Z. *Planirovaniye eksperimenta v Statgraphics*. [Planning an experiment in Statgraphics]. Krasnoyarsk, 2012, 270 p. (in Russ.).
17. Aleksakhin S.V., Baldin A.V., Krinitin V.V. et al. *Prikladnoy statisticheskiy analiz dannykh*. [Applied statistical data analysis]. Moscow, 1998, 352 p. (in Russ.).
18. Perel'shteyn M.Ye. *Pribory i sistemy upravleniya*, 1971, no. 1, pp. 22–24. (in Russ.).
19. Kiyasbeyli A.SH., Perel'shteyn M.Ye. *Vikhrevyye schetchiki-raskhodometry*. [Vortex flowmeters]. Moscow, 1974, 160 p. (in Russ.).
20. Ford C.L., Winroth P.M., Alfredsson P.H. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2018, vol. 59, pp. 88–102. DOI: 10.1016/j.flowmeasinst.2017.12.004.

Received April 26, 2018

Revised August 8, 2018

Accepted September 1, 2018

For citing: Alashkevich Iu.D., Lur'e M.S., Lur'e O.M., Frolov A.S. *Khimiya Rastitel'nogo Syr'ya*, 2018, no. 4, pp. 273–279. (in Russ.). DOI: 10.14258/jcprm.2018044036.

