

В результате использования ротатбельного планирования второго порядка получено следующее уравнение регрессии:

$$y = 1179,43 + 36,011 \cdot x_2 - 71,29 \cdot x_3 + 62,19 \cdot x_1^2.$$

Проверка гипотезы об адекватности модели показала, что модель адекватна при 5%-м уровне значимости. Вычисленные по уравнению значения  $y$  отличаются от экспериментальных на величины, не превышающие ошибку опыта.

Переходя от кодированных  $x_1, x_2, x_3$  значений факторов к натуральным  $\varphi, \lambda, \gamma$  получена зависимость максимальной тангенциальной составляющей силы резания от элементов геометрии зуба торцевой фрезы:

$$P_T = 2263,29 - 33,17\varphi + 6\lambda - 11,88\gamma + 0,2764\varphi^2.$$

Уравнение адекватно, поэтому его можно использовать как интерполяционную формулу для вычисления величины  $P_T$ , а также для установления рациональных значений элементов геометрии зуба при торцовом фрезеровании высокопрочного чугуна.

Решение вручную поставленной интерполяционной задачи требует очень много временных затрат и не исключает случайных ошибок, которые может допустить разработчик.

Для автоматизированного решения задачи предлагается выбрать открытую систему Scilab, которая является мощным математическим пакетом для решения математических, инженерных задач. Основным преимуществом этой системы является то, что пользователю не обязательно быть программистом, чтобы решать вычислительные задачи в различных областях науки и техники. Система Scilab работает в режиме интерпретатора, а также позволяет обрабатывать программы, написанные на встроенном языке. Scilab очень удобна для автоматизации инженерных расчетов, позволяя создавать не только обычные, но и визуальные приложения.

#### Литература

1. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. В. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

### ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИХРЕВЫХ РАСХОДОМЕРОВ

А. А. Ходыкина

*Сибирский государственный университет науки и технологий  
имени академика М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация*

Научный руководитель А. С. Фролов

*Рассмотрен вопрос имитационного моделирования тел обтекания вихревых расходомеров в условиях эксплуатации. Приведены результаты исследования измерительных характеристик рассматриваемых тел.*

**Ключевые слова:** вихревые расходомеры, тело обтекания, моделирование, число Струхала.

Вихревые расходомеры являются перспективным средством измерения расхода оборотной, свежей и горячей воды на предприятии. Они могут применяться и для учета объемов воды, протекающих как по трубопроводам, так и в открытых каналах.

Данные устройства представляют собой генераторы вихрей (или тела обтекания (ТО)) в виде штанги (рис. 1, а), которые устанавливаются в технологический трубопровод с помощью специального стакана. Совместно с рабочим трубопроводом такая конструкция превращается в расходомер (рис. 1, б).

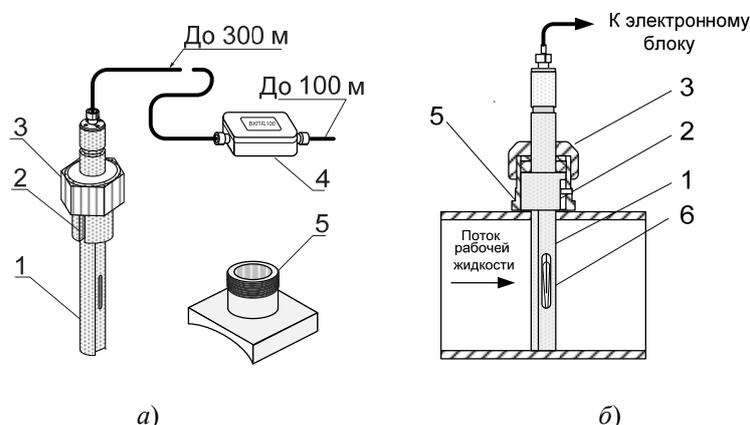


Рис. 1. Погружной вихревой расходомер (а), установленный на рабочем трубопроводе (б):  
1 – тело обтекания; 2 – корпус; 3 – гайка; 4 – корпус электронного блока;  
5 – стакан; 6 – преобразователь вихревых колебаний

Принцип работы вихревого расходомера основан на образовании вихрей за ТО и последующем их учете. Частота вихреобразования [1] может быть найдена по выражению (1):

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

где  $V$  – средняя скорость потока в сечении трубопровода, в котором установлено тело обтекания, м/с;  $d$  – характерный размер тела обтекания, м;  $\text{Sh}$  – безразмерная величина, называемая числом Струхалия.

В свою очередь объемный расход  $Q$  жидкости, измеренный по прибору, определяется по выражению

$$Q = 3600S \frac{d}{\text{Sh}} f, \quad (2)$$

где  $S$  – поперечное сечение трубопровода, м<sup>2</sup>.

Применяемая в вихревом расходомере форма ТО, связанная с числом Струхалия  $\text{Sh}$ , во многом определяет параметры расходомера, такие как диапазон работы, стабильность и точность показаний. Форма ТО в зависимости от фирмы-производителя может быть как относительно простой в виде цилиндра, так и сложной геометрической формы [2].

Для проведения сравнительного анализа ТО вихревых расходомеров выберем три их вида наиболее встречающихся на практике. Характерные размеры всех исследуемых тел были взяты одинаковыми ( $d = 26,533$  мм) с шириной канала обратной связи 10 мм. Канал обратной связи (КОС) стабилизирует вихреобразование, что положительно влияет на его измерительные характеристики [3]. Поперечные сечения исследуемых ТО с соответствующими размерами приведены на рис. 2.

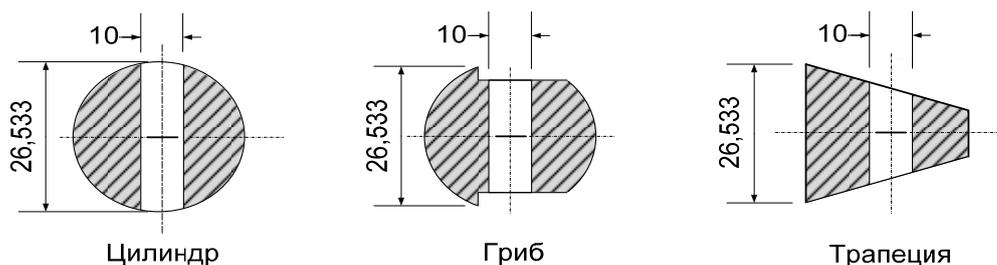


Рис. 2. Поперечные сечения исследуемых тел обтекания

Для выполнения исследования мы использовали имитационное моделирование с помощью программы Comsol Multiphysics. Это мощная интерактивная среда для моделирования и решения научных и технических проблем, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных, поддерживающая конечно-элементную технологию вместе с адаптивным построением сетки и контролем ошибок при работе с различными численными решателями [4]. Данное программное обеспечение позволяет моделировать самые различные задачи гидродинамики, в том числе задачи о ламинарном и турбулентном течении различных жидкостей.

На первом этапе исследования 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 исследуемое ТО. Сформированная эпюра скоростей на первом этапе исследования передавалась на вход измерительного участка, и проводился дальнейший расчет.

Для каждого ТО и каждого значения скорости  $V$  путем постпроцессорной обработки были получены графики колебания давления  $P$ , усредненного по боковой проекции ТО.

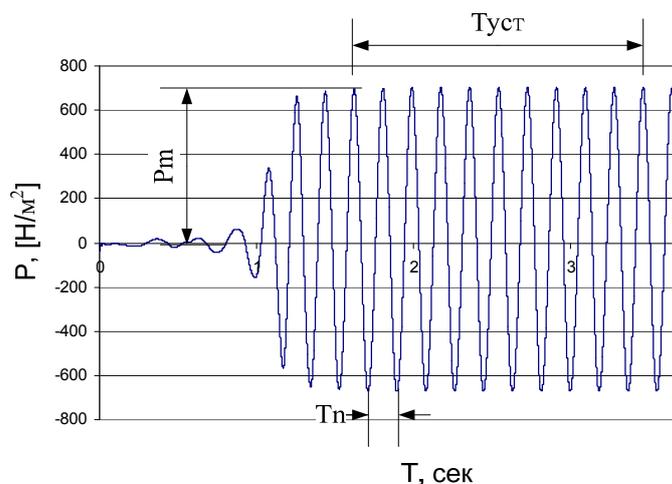


Рис. 3. График усредненного давления  $P_m$  на ТО Цилиндр:  
 $P_m$  – амплитуда давления;  $T_{уст}$  – длительность интервала усреднения;  
 $T_n$  – длительность одного периода вихреобразования

Для каждого значения числа  $V$  определялось среднее значения периода  $T_{cp}$  на интервале усреднения, по которому согласно (3) находится число  $Sh$ :

$$Sh = \frac{d}{VT_{cp}}, \quad (3)$$

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

Для каждого ТО находилось среднее значение числа  $Sh_{cp}$  в рабочем диапазоне ( $0,125 \leq V \leq 0,45$ ). Отклонение от среднего значения  $\Delta Sh, \%$ , определяется из выражения (4). Данные расчетов приведены на рис. 4.

$$\Delta Sh, \% = \frac{Sh_{cp} - Sh}{Sh_{cp}}. \quad (4)$$

Результатами постпроцессорной обработки данных численного эксперимента являлись зависимость числа Струхалия  $Sh$  для каждого ТО в исследуемом диапазоне  $V$ .

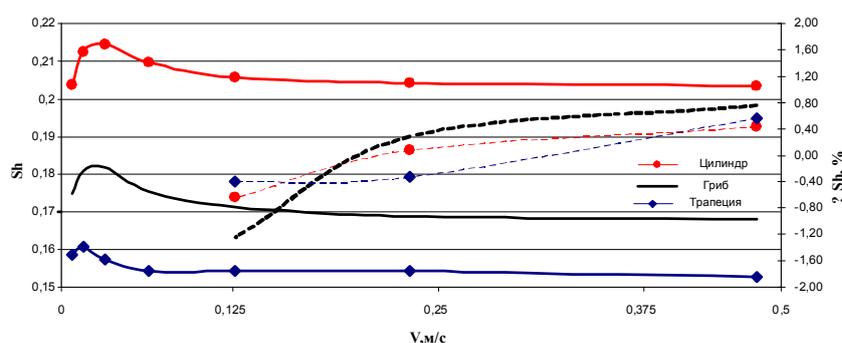


Рис. 4. График зависимости  $Sh = f(V)$  и  $\Delta Sh, \% = f(V)$

Таким образом, из полученных данных видно, что зависимость числа  $Sh = f(V)$  для всех ТО носит в целом одинаковый характер, отличаясь лишь величиной  $Sh$ .

Следует отметить, что в рабочем диапазоне скоростей потока, соответствующем  $V > 0,125$ , для всех ТО наблюдается некоторое снижение числа  $Sh$  с увеличением скорости потока жидкости. Наименьшим отклонением числа  $Sh$  от среднего значения в рабочем диапазоне скоростей, равным 0,96 %, обладает ТО Трапеция, что позволяет не вводить коррекцию в измерительный тракт прибора [5]. Для ТО Цилиндр и Гриб такое отклонение несколько больше и составляет 1,07 и 2 % соответственно.

#### Литература

1. Альшева, К. В. Методы и особенности исследования вихревых расходомеров / К. В. Альшева // Вестн. ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». – 2018. – Т. 18, № 3. – С. 119–123.
2. A. K. EL WAHED, M. W. JOHNSON and J. L. SPROSTON. Numerical study of vortex shedding from different shaped bluff bodies / A. K. EL WAHED, M. W. JOHNSON and J. L. SPROSTON // Flow Meas. Instrum – 1993. – Vol. 4, № 4. – P. 233–240.
3. Лурье, М. С. Промышленные расходомеры в целлюлозно-бумажном производстве / М. С. Лурье, О. М. Лурье, А. С. Фролов // Изв. Санкт-Петербург. гос. лесотехн. акад. – 2019. – № 227. – С. 271–292.

4. Шмелев, В. Е. Femlab 2.3. Руководство пользователя / В. Е. Шмелев. – М. : Диалог-МИФИ, 1999. – 442 с.
5. Лурье, М. С. Погрешности погружных вихревых расходомеров и методы их снижения / М. С. Лурье, О. М. Лурье // Датчики и системы. – 2012. – № 1. – С. 25–29.

## МОДЕЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ШЛАМОВЫХ ГРУНТОВ В ГГИС MICROMINEORIGIN&BEYOND

В. А. Кузьмич

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск*

Научный руководитель А. А. Кологривко

*Представлен алгоритм построения трехмерной модели шламохранилища № 3 1РУ ОАО «Беларуськалий» в горно-геологической информационной системе Micromine Origin & Beyond. Проведены результаты модельных исследований по конечным физико-механическим и водно-физическим показателям шламовых грунтов.*

**Ключевые слова:** калийные предприятия, шламохранилище, ГГИС Micromine.

На современном этапе освоения калийных месторождений количество отходов извлекаемой горной массы в 6 раз превышает количество основной продукции. Как следствие, существенным фактором антропоизации в районе работ ОАО «Беларуськалий» являются накопленные и хранящиеся твердые галитовые и жидкие шламовые отходы (рис. 1).



а)

б)

Рис. 1. Хвостовое хозяйство 1РУ ОАО «Беларуськалий»:

а – солеотвал; б – шламохранилище № 3

Вместе с тем развитие хвостового хозяйства 1 РУ ОАО «Беларуськалий» в пределах существующего солеотвала в настоящее время является технологически сложным процессом.

Требования по расширению рудной базы и увеличению объемов производства ОАО «Беларуськалий», отсутствие системной возможности отвода площадей, ограничение развития работ хвостового хозяйства в пределах существующего отвала в совокупности актуализируют задачу складирования галитовых отходов в существенных объемах.