

оскільки різниця у розрахунках при порівнянні з іншими формулами становить < 4%.

1.Константинов Ю.М., Гіжа О.О. Технічна механіка рідини і газу. – К.: Вища школа, 2002. – 277 с.

2.Калюжний А.П., Гузинін О.О. Визначення втрат напору та еквівалентної шорсткості сталевих труб / Науково-технічний збірник «Комунальне господарство міст», серія «Технічні науки та архітектура», вип. № 99. – Харків, 2011. – С. 320-326.

3.Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления. – М.: Недра, 1982. – 224 с.

4.Башта Т.М. и др. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы. – М.: Машиностроение, 1984. – 424 с.

5.Константинов Ю.М., Гіжа О.О. Інженерна гідравліка. – К.: Видавничий дім «Слово», 2006. – 432 с.

6.Прозоров И.В. и др. Гидравлика, водоснабжение и канализация. – М.: Высш. шк., 1990. – 448 с.

7.Черников А.В., Талипов Р.Ф. Об использовании уравнения Кольбука при гидравлическом расчете трубопроводов по обобщенной формуле / Журнал «Трубопроводный транспорт (теория и практика)», вып. № 4. – М., 2010. – С. 14-16.

8.Шевелев Ф.А., Шевелев А.Ф. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. пособие. – М.: Стройиздат, 1984. – 116 с.

9.ДСТУ Б В.2.7-151:2008. Труби поліетиленові для подачі холодної води. Технічні умови. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 33 с.

10.Добромислов А. Я. Таблицы для гидравлических расчетов напорных и безнапорных трубопроводов из полимерных материалов. – М.: Издательство ВНИИМП, 2002. – 321с.

*Отримано 21.01.2013*

УДК 612.644.01

А.Ф.СТРОЙ, Е.З.ПИОТРОВСКИ, доктора техн. наук,  
М. СТАЖОМСКА

*Технологический университет «Свентокишская политехника, г.Кельце (Польша)*

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ МАЛОЙ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ**

Рассматривается моделирование гидродинамических процессов с помощью потока воздуха. Получен критерий подобия, который должен быть неизменным при моделировании этих процессов. Даны рекомендации применения аэродинамических коэффициентов к задачам анализа и расчёта гидродинамических процессов.

Розглядається моделювання гідродинамічних процесів за допомогою потоку повітря. Визначений критерій подібності, який повинен бути незмінним при моделюванні цих процесів. Розроблені рекомендації використання аеродинамічних коефіцієнтів для аналізу та розрахунків гідродинамічних процесів.

The article considers modeling of hydrodynamic processes with a stream of air. Obtained the similarity criterion, which must be constant in the modeling of these processes. Recommendations were given for the use of aerodynamic coefficients for the structure analysis and calculation of hydrodynamic processes.

*Ключевые слова:* моделирование, критерий подобия, гидродинамические процессы, аэродинамический коэффициент, гидродинамический коэффициент.

Проблемы малой гидроэнергетики, в частности использование энергии воды малых рек, связаны с недостаточным количеством данных, необходимых для анализа и расчёта гидродинамического оборудования. Это касается, в первую очередь, гидродинамических коэффициентов. В то же время, в литературе, для различных вариантов, есть значения аэродинамических коэффициентов.

Если предположить что аэродинамический коэффициент подобный гидродинамическому то, основываясь на теории подобия, можно использовать численные значения аэродинамических коэффициентов для анализа и расчётов гидродинамических процессов. С целью анализа физического смысла аэродинамических коэффициентов рассмотрим процесс обтекания плоской пластины. Воздух движется перпендикулярно к плоскости пластины (рисунок) с заданной скоростью  $\vartheta$ .

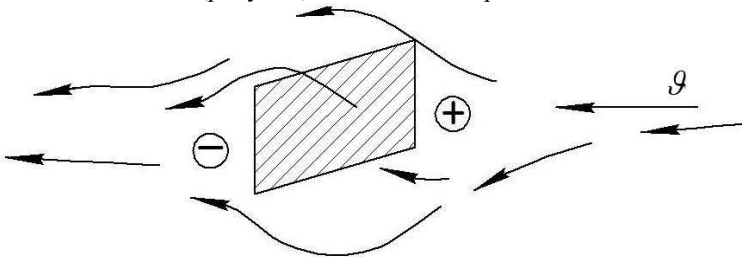


Схема обтекания плоской пластины потоком воздуха

- ⊕ – наветренная сторона пластины (зона избыточного давления);
- ⊖ – заветренная сторона пластины (зона разрежения)

С наветренной стороны пластины поток воздуха будет создавать избыточное давление, с заветренной – разрежение. С наветренной стороны динамическое давление потока воздуха около поверхности пластины будет переходить в статическое и в результате давление с наветренной стороны будет больше, чем атмосферное давление, т.е.

$$P_n = P_a + P_{cm}^n, \text{ Па} \quad (1)$$

где  $P_a$  – атмосферное давление, Па;  $P_{cm}^n$  – статическое давление с наветренной стороны около пластины, Па.

С заветренной стороны будет разрежение, которое возникает в результате действия ветра на пластину. Давление с заветренной стороны равно

$$P_z = P_a - P_{cm}^z, \text{ Па}, \quad (2)$$

где  $P_{cm}^z$  – статическое давление с заветренной стороны, Па.

Давление, которое оказывает воздействие на пластину, можно определить как разницу давлений с наветренной и заветренной стороны, т.е.

$$\Delta P = P_n - P_z = P_a + P_{cm}^H - P_a + P_{cm}^3 = P_{cm}^H + P_{cm}^3, \text{ Па.} \quad (3)$$

Сила, которая действует на пластину, зависит от площади пластины. Эту силу можно вычислить по формуле

$$F = \Delta P \cdot S = (P_{cm}^H + P_{cm}^3) \cdot S, \text{ Н,} \quad (4)$$

где  $S$  – площадь пластины,  $\text{м}^2$ .

Таким образом, чтобы определить силу, которая будет действовать на пластину, необходимо знать статическое давление как с наветренной стороны, так и с заветренной. Статическое давление наиболее просто определить экспериментальным способом. Оно зависит от скорости потока воздуха, его плотности, размеров пластины и места расположения точки для определения давления. Скорость потока и плотность воздуха в свою очередь характеризуют динамическое давление. Таким образом, статическое давление как с наветренной стороны, так и с заветренной стороны зависит от величины динамического давления.

На основе практического опыта замечено, что соотношение статического давления к динамическому не зависит от скорости движения потока воздуха. Это соотношение зависит от размеров пластины и ориентации её относительно потока воздуха. Соотношение статического давления к динамическому называют аэродинамическим коэффициентом. Этот коэффициент вычисляют по формуле

$$k = \frac{P_{cm}}{P_{дин}} = \frac{P_{cm}}{\frac{\vartheta^2}{2} \cdot \rho}, \quad (5)$$

где  $P_{cm}$  – статическое давление в соответствующей точке, Па;  $P_{дин}$  – динамическое давление потока воздуха, Па;  $\vartheta$  – скорость движения потока воздуха, м/с;  $\rho$  – плотность воздуха,  $\text{кг/м}^3$ .

Аэродинамический коэффициент, чаще всего, определяют с помощью моделирования аэродинамического процесса. С этой целью модель того или иного предмета, или сам предмет размещают в аэродинамической трубе. Продувают его потоком воздуха и измеряют статическое и динамическое давление. Затем вычисляют аэродинамический коэффициент. В существующей литературе [1, 2] и других источниках приведены численные значения аэродинамических коэффициентов или формулы, с помощью которых можно определить эти коэффициенты для раз-

ных случаев. Как уже отмечалось, интерес представляет использование этих значений для анализа и расчетов гидродинамических процессов. Для этого необходимо иметь зависимости, которые позволят, на основании значений аэродинамических коэффициентов, определить гидродинамические коэффициенты. Эти зависимости можно получить с помощью теории подобия.

Предположим, что гидродинамический процесс обтекания плоской пластины подобен аэродинамическому. Основным условием подобия физических процессов есть то, что они должны описываться одинаковыми уравнениями или одинаковой системой уравнений [3]. Будем считать, что гидродинамический, это натурный процесс (натура), а аэродинамический процесс – модель натурального процесса. Для модели, статическое давление с наветренной стороны у поверхности плоской пластины можно вычислить по формуле

$$P_{cm} = k \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \text{ Па.} \quad (6)$$

Сила, которая действует на плоскую пластину с наветренной стороны, равна

$$F = P_{cm} \cdot S = k \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \cdot S, \text{ Н.} \quad (7)$$

Если считать, что гидродинамический процесс подобен аэродинамическому, то силу действия потока воды на плоскую пластину (с одной стороны) можно определить по аналогичной формуле

$$F_w = k_w \cdot \frac{v_w^2}{2} \cdot \rho_w \cdot S_w, \text{ Н,} \quad (8)$$

где  $k_w$  – гидродинамический коэффициент;  $v_w$  – скорость потока воздуха, м/с;  $\rho_w$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $S_w$  – площадь пластины, м<sup>2</sup>.

Уравнение (8) соответствует натуре, а уравнение (7) – модели.

Из теории подобия известно [4], что процессы будут подобны, если критерии подобия для модели и природы будут неизменными (инвариантными). Для вывода критериев подобия введем понятие масштаб подобия.

Обозначим масштаб подобия сил  $C_F = \frac{F}{F_w}$ , масштаб подобия

аэродинамического и гидродинамического коэффициентов  $C_k = \frac{k}{k_w}$ .

Аналогічно обозначим масштаб подобия скорости потока жидкости, плотности и масштаб геометрического подобия.

$$C_{\vartheta} = \frac{\vartheta}{\vartheta_w}; C_{\rho} = \frac{\rho}{\rho_w}; C_S = \frac{S}{S_w}. \quad (9)$$

Выразим параметры модели через параметры натуры и масштабы подобия, получим

$$F = C_F \cdot F_w; k = C_k \cdot k_w; \vartheta = C_{\vartheta} \cdot \vartheta_w; \rho = C_{\rho} \cdot \rho_w; S = C_S \cdot S_w. \quad (10)$$

Подставим эти значения в уравнение, которое соответствует модели, т.е. в уравнение (7), в результате имеем

$$C_F \cdot F_w = C_k \cdot k_w \cdot \frac{C_{\vartheta}^2 \cdot \vartheta_w^2}{2} \cdot C_{\rho} \cdot \rho_w \cdot C_S \cdot S_w. \quad (11)$$

Уравнение (11), которое характеризует аэродинамический процесс, будет совпадать с уравнением (8) в случае, когда

$$C_F = C_k \cdot C_{\vartheta}^2 \cdot C_{\rho} \cdot C_S. \quad (12)$$

Другими словами, если выполняется уравнение (12), то процесс в натуре будет подобен процессу на модели. Подставим в уравнение (12) значения масштабов подобия, будем иметь

$$\frac{F}{F_w} = \frac{k}{k_w} \cdot \left( \frac{\vartheta}{\vartheta_w} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_w} \cdot \frac{S}{S_w} \quad (13)$$

или

$$\frac{F}{k \cdot \vartheta^2 \cdot \rho \cdot S} = \frac{F_w}{k_w \cdot \vartheta_w^2 \cdot \rho_w \cdot S_w}. \quad (14)$$

На основании уравнения (14) можно сделать вывод о том, что аэродинамический процесс на модели будет подобным гидродинамическому процессу в случае, когда критерий  $\frac{F}{k \cdot \vartheta^2 \cdot \rho \cdot S}$ , составленный из пара-

метров модели, будет равным такому же критерию, составленному из физических параметров, характеризующих процесс в натуре, т.е. если выполняется условие

$$\frac{F}{k \cdot \vartheta^2 \cdot \rho \cdot S} = \frac{F_w}{k_w \cdot \vartheta_w^2 \cdot \rho_w \cdot S_w} = in\ var, \quad (15)$$

то процессы подобны.

Необходимо отметить что уравнение (15) позволяет вычислить гидродинамический коэффициент на основании полученного в результате моделирования аэродинамического коэффициента. Кроме этого, можно определить усилие, которое будет воздействовать на пластину, если промоделировать процесс с помощью потока воздуха. Например, нужно определить силу, действующую на пластину, которая расположена перпендикулярно потоку воды, движущемуся со скоростью  $v_w = 0,5 \text{ м/с}$ . Пластина имеет размеры  $a \times b = 0,5 \times 1,0 \text{ м}$ , площадь пластины  $S_w = 0,5 \text{ м}^2$ . Гидродинамический процесс был смоделирован в аэродинамической трубе с помощью потока воздуха. При моделировании размеры пластины приняты такими же, как и в натуре. Скорость движения воздуха была  $v = 10 \text{ м/с}$ , температура воздуха  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность  $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$ . Аэродинамический коэффициент, со стороны набегающего потока воздуха при моделировании составил величину  $k = 0,6$ .

Так как геометрические размеры пластины для модели и натуре одинаковые, т.е.  $S = S_w$ , то масштаб геометрического подобия  $C_s = 1$ .

Принимаем масштаб подобия сил также равным единице, т.е.  $C_F = \frac{F}{F_w}$ ,

тогда с учётом значений этих двух масштабов уравнение (12) можно записать в виде

$$C_k \cdot C_v^2 \cdot C_\rho = 1. \quad (16)$$

После подстановки значений масштабов подобия в это уравнение получим

$$\frac{k}{k_w} \cdot \left( \frac{v}{v_w} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_w} = 1. \quad (17)$$

Из последнего выражения гидродинамический коэффициент равен

$$k_w = k \cdot \left( \frac{v}{v_w} \right)^2 \cdot \frac{\rho}{\rho_w}. \quad (18)$$

Подставим необходимые данные в уравнение (18), после вычислений получим

$$k_w = 0,6 \cdot \left( \frac{10}{0,5} \right)^2 \cdot \frac{1,2}{1000} = 0,288.$$

Сила, которая оказывает воздействие на пластину со стороны набегающего потока воды

$$F_w = k_w \frac{v_w^2}{2} \rho_w \cdot S_w = 0,288 \frac{0,5^2}{2} \cdot 1000 \cdot 0,5 = 18 \text{ Н.}$$

Аналогично можно определить гидродинамический коэффициент с противоположной стороны пластины, а также усилие, действующее на пластину с этой стороны. Затем можно вычислить результирующее усилие, действующее на пластину.

Приведенный пример иллюстрирует, что данные, которые получены при исследованиях аэродинамических процессов могут быть использованы при анализе и расчётах гидродинамических процессов, в частности процессов, связанных с расчётом оборудования для получения энергии от возобновляющихся источников.

1. Батурин В.В. Отопление, вентиляция и газоснабжение, часть II. Вентиляция. – М. Госстройиздат, 1959. – 291 с.
2. Ретгер Э.И., Стриженов С.И. Аэродинамика зданий. – М. Стройиздат. – 240 с.
3. Резняков А.Б. Метод подобия. – Изд-во АН КазССР, Алма-Ата, 1959. – 151 с.
4. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М. «Высшая школа», 1963. – 253 с.

*Получено 24.09.2012*

УДК 628.16

С.М.ЭПОЯН, д-р техн. наук, А.С.КАРАГЯУР, канд. техн. наук,  
Д.А.ЧЕЧИКОВА

*Харьковский национальный университет строительства и архитектуры*

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВКИ УСТАНОВКИ МЕМБРАННОЙ УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ**

Рассматривается промывка установки мембранной ультрафильтрации с «тупиковой» фильтрацией. Представлены обоснования параметров промывки, обеспечивающие минимальное время промывки и объем промывных вод.

Розглядається промивка установки мембранної ультрафільтрації з «тупиковою» фільтрацією. Представлено обґрунтування параметрів промивки, що забезпечують мінімальний час промивки та об'єм промивних вод.

The washing of plant membranes with a "dead-end" filtration are considered. The justification of washing parameters which minimize time washing and the amount of washing water are presented.

*Ключевые слова:* установка мембранной ультрафильтрации, время промывки, объем промывной воды, траектория частицы взвеси.

В последнее время для очистки небольших расходов воды от взвешенных и коллоидных веществ все более широко применяются ультрафильтрационные модули с полволоконными мембранными элементами. Основным недостатком данного оборудования является резкая зависимость потерь напора и производительности от качества исходной во-