

УДК 532.5(045)

З. Р. Муфтахутдинова, старший преподаватель  
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

## О РАСЧЕТЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕЗНАПОРНЫХ ПОТОКОВ В РАМКАХ КОНЦЕПЦИИ ЭФФЕКТИВНОГО ДИАМЕТРА

*При выполнении гидравлических расчетов безнапорных потоков используется гидравлический радиус, который недостаточно точно учитывает особенности геометрии канала. Предложено использовать концепцию эффективного диаметра для учета влияния формы поперечного сечения на гидравлическое сопротивление каналов. Определены значения коэффициентов гидравлического сопротивления для каналов различных форм сечения.*

**Ключевые слова:** безнапорное течение, гидравлическое сопротивление, гидравлический радиус, эффективный диаметр.

Закономерности равномерного безнапорного движения жидкости в каналах и трубах изучаются сравнительно давно. Однако до сих пор остаются спорными многие положения гидравлического расчета безнапорных потоков, встречающихся в системах нефтетранспорта, водоотведения, в гидротехнических сооружениях и т. д.

Гидравлический расчет безнапорного равномерного движения жидкости базируется на формуле Шези:

$$V = C\sqrt{RI},$$

где  $V$  – средняя скорость движения жидкости, м/с;  
 $R$  – гидравлический радиус, м;

$$R = \frac{S}{\Pi},$$

$S$  – площадь поперечного сечения канала, м<sup>2</sup>;  $\Pi$  – смоченный периметр, м;  $I$  – гидравлический уклон:

$$I = \frac{h_{тр}}{l},$$

$h_{тр}$  – потери напора на трение, м;  $l$  – длина канала, м;  $C$  – коэффициент Шези, м/с<sup>2</sup>:

$$C = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}},$$

$\lambda$  – коэффициент гидравлического трения (коэффициент Дарси);  $g$  – ускорение свободного падения.

Формула Шези считается универсальной для различных форм поперечных сечений, поскольку единственным параметром, описывающим форму сечения, является эквивалентный гидравлический радиус. В то же время принятое в формуле Шези подобие любой формы сечения потока кругу с геометрической точки зрения не совсем верно и приводит к значительным погрешностям в расчетах.

Проведенные в последнее время исследования подтвердили существенное влияние формы потоков на их гидравлические характеристики. Так, например, Р. Пауэлл на основании результатов собственных опытов, проведенных в институте гидравлических исследований штата Айова (США) в прямоугольных каналах, и экспериментов Оуэна в треугольных ка-

налах с углом при вершине 90° сделал вывод, что «форма поперечного сечения, по-видимому, является довольно важной, и одна и та же формула не может быть применена без некоторой поправки для расчета прямоугольных и треугольных лотков» [1].

Казенпур и Апельг [2] на основании экспериментальных исследований в прямоугольных каналах предложили вводить в коэффициент Дарси, полученный для круглых напорных труб, поправки, учитывающие, по их мнению, влияние отношения сторон.

Л. А. Тепакс [3] показал, что форма поперечного сечения оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление безнапорных потоков, и предложил учитывать это влияние изменением коэффициентов в формулах Прандтля – Никурадзе для круглых труб.

Шоклич [4] предложил при расчетах открытых безнапорных потоков учитывать влияние свободной поверхности путем увеличения длины смоченного периметра на 10 %.

А.-Х. Бассам [5], проведя эксперименты в прямоугольных, треугольных и трапециевидных каналах, предложил использовать для расчета каналов, имеющих форму сечения, отличную от круглой, специальную зависимость:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = A \lg Re + B,$$

где  $A, B$  – коэффициенты, зависящие от формы поперечного сечения.

Таким образом, практически все проведенные исследования привели к выводу о том, что форма поперечного сечения канала оказывает существенное влияние на гидравлическое сопротивление безнапорных потоков, и гидравлический радиус не позволяет достаточно полно учесть особенности геометрии каналов. Поэтому многие авторы предложили учитывать это влияние путем введения дополнительных параметров и специальных коэффициентов.

Можно понять желание авторов предложить свои эмпирические зависимости для расчета гидравлических характеристик в каналах различных форм поперечных сечений. Однако они применимы только для тех конкретных условий (форма сечения, шероховатость стенок, режим течения), для которых получе-

ны, а на практике встречаются различные условия. В этом мы видим ограниченность такого подхода.

Перспективной, по нашему мнению, является концепция эффективного диаметра, разработанная Р. Х. Муллахметовым для напорных потоков [6]. В основе концепции лежит новый геометрический масштаб – эффективный диаметр. Для трубы круглого сечения данный параметр равен диаметру, а для труб некруглого сечения – произведению:

$$d_{\text{э}} = d_{\Gamma} K,$$

где  $K$  – корректирующий множитель.

Данный корректирующий множитель вводится на основании теории сопротивления при ламинарном напорном течении жидкости в призматических трубах. В данном разделе теории сопротивления строго установлено, что потери на трение должны рассчитываться по формуле:

$$h_{\text{тр}} = \frac{A}{\text{Re}_{\Gamma}} \frac{l}{d_{\Gamma}} \frac{V^2}{2g},$$

где  $A$  – коэффициент гидравлического сопротивления, зависящий от геометрии канала.

Для обеспечения равенства потерь напора, рассчитываемых по данной формуле и в рамках концепции эффективного диаметра, коэффициент  $K$  должен рассчитываться из соотношения:

$$\frac{A}{\text{Re}_{\Gamma}} \frac{l}{d_{\Gamma}} \frac{V^2}{2g} = \frac{A_d}{\text{Re}_{\text{э}}} \frac{l}{d_{\text{э}}} \frac{V^2}{2g},$$

где  $A_d$  – коэффициент гидравлического сопротивления круглой трубы,  $A_d = 64$ .

Тогда

$$\frac{A}{\text{Re}_{\Gamma}} \frac{l}{d_{\Gamma}} = \frac{A_d}{\text{Re}_{\text{э}}} \frac{l}{d_{\text{э}}}$$

или

$$\frac{A}{d_{\Gamma}^2} = \frac{A_d}{d_{\text{э}}^2},$$

следовательно,

$$K = \frac{d_{\text{э}}}{d_{\Gamma}} = \sqrt{\frac{A_d}{A}}.$$

В силу органического единства природы напорных и безнапорных течений, подчеркиваемого рядом авторов [7–9], концепция эффективного диаметра может быть успешно распространена и на безнапорные потоки. Формула Шези в рамках концепции запишется в следующем виде:

$$V = C \sqrt{R_3 I}.$$

Значения коэффициента  $A$  могут быть получены путем решения уравнения Пуассона, описывающего процессы безнапорного ламинарного движения жидкости в каналах:

$$g \sin \alpha + \nu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} \right) = 0$$

при граничных условиях  $u = 0$  на твердой стенке и  $\frac{\partial u}{\partial y} = 0$  на свободной поверхности [10].

В результате численного исследования определены значения коэффициентов гидравлического сопротивления каналов различных форм сечения (трапециевидальной, прямоугольной и т. д.) при разных степенях наполнения. Для проверки разработанной программы рассчитаны коэффициенты для напорного течения в прямоугольном канале. Они согласуются с имеющимися значениями [11] с погрешностью, не превышающей 1 %.

Результаты расчета коэффициентов гидравлического сопротивления каналов аппроксимируются следующими зависимостями:

для трапециевидального канала с углом откоса  $45^\circ$ :

$$A = 60,775 - 6,643 \sqrt{B/H} + 5,562 B/H - 0,146 (B/H)^2;$$

где  $B/H$  – степень наполнения канала;

для канала в виде равнобедренного треугольника:

$$A = 45,65 + 0,4865 \alpha - 0,0054 \alpha^2;$$

где  $\alpha$  – угол при вершине;

для прямоугольного канала:

$$A = 58,75 + 0,521 B/H + 0,164 (B/H)^2;$$

для канала в виде однобочной трапеции с углом откоса  $45^\circ$ :

$$A = 53,5 - 3,96 \sqrt{\alpha} + 0,78 \alpha - 0,00456 \alpha^2.$$

Анализ полученных результатов подтверждает влияние формы поперечного сечения на гидравлическое сопротивление. Для канала прямоугольной формы обнаружено, что гидравлически наиболее выгоднейшему сечению ( $B/H = 2$ ) соответствует минимальное значение коэффициента  $A$  [12].

Полученные зависимости могут использоваться для определения гидравлического сопротивления каналов с учетом их геометрии в рамках концепции эффективного диаметра. Предлагаемая методика позволит, по нашему мнению, устранить многие проблемы, связанные с недостаточной точностью расчетов гидравлических сопротивлений (повышенные эксплуатационные расходы, заиливание канализационных сетей и т. д.).

#### Библиографические ссылки

1. Маастик А. А. О влиянии формы поперечного сечения на гидравлические сопротивления в открытых призматических руслах // Сб. науч. трудов ЭСХА. – 1963. – С. 59–83.
2. Аль-Хедер Бассам. Гидравлические сопротивления при равномерном безнапорном течении жидкости : дис. ... канд. техн. наук. – М., 1991.

3. *Тенакс Л. А.* Равномерное турбулентное движение в трубах и каналах. – Таллин : Валгус, 1975. – 256 с.

4. *Маастик А. А.* О влиянии формы поперечного сечения на гидравлические сопротивления в открытых призматических руслах. С. 59–83.

5. *Аль-Хедер Бассам.* Гидравлические сопротивления при равномерном безнапорном течении жидкости. М., 1991.

6. *Муллахметов Р. Х.* О новом геометрическом масштабе и его применении для расчета сопротивления при движении жидкости в трубах некруглого сечения // Теплофизика высоких температур. – 1983. – № 2. – С. 414. – Деп. В ВИНТИ, рег. № 62-38-82.

7. *Альтиуль А. Д. и др.* О влиянии формы сечения русла на гидродинамические характеристики турбулентных открытых потоков // Известия вузов. Энергетика. – 1992. – № 4. – С. 91-94.

8. *Муфтахутдинова З. Р.* Об учете влияния формы сечения на гидравлическое сопротивление безнапорных потоков водоотведения // Современные тенденции в науке и

образовании : сб-к науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. : в 6 ч. – Ч. V. – М. : АР-Консалт, 2014. – С. 139–140.

9. *Muftahutdinova Z. R.* About influence of cross-sectional shape of the hydraulic resistance of gravity flow. В сборнике: Fourth Forum of young researchers. In the framework of international forum « Education quality – 2014» Conference Proceedings. Editorial board: Boris Yakimovich; Yury Turygin. Izhevsk, Russia, 2014. – С. 222–223.

10. *Муфтахутдинова З. Р., Султанов И. С.* Интегральные характеристики безнапорного течения жидкости в канале круглого сечения // Научный и информационный бюллетень. – Ижевск : Персей, 1997. – С. 180–183.

11. *Жукаускас А. А.* Конвективный перенос в теплообменниках. – М. : Наука, 1982. – 472 с.

12. *Муфтахутдинова З. Р.* К вопросу расчета сетей водоотведения // Современные тенденции в науке и образовании : сб-к науч. тр. по матер. Междунар. науч.-практ. конф. : в 6 ч. – Ч. V. – М. : АР-Консалт, 2014. – С. 137–138.

\*\*\*

*Z. R. Muftahutdinova*, Senior lecturer, Kalashnikov ISTU

#### **About hydraulic resistance of gravity flows within the concept of the effective diameter**

*In hydraulic calculations of gravity flows the hydraulic radius is used that does not take into account the particular geometry of the channel accurately. The author proposed using the concept of the effective diameter to account the influence of cross-section on the hydraulic resistance of channels. The hydraulic resistance coefficients were obtained for channels with different cross-section geometry.*

**Keywords:** gravity flow, hydraulic resistance, hydraulic radius, effective diameter.

Получено: 15.04.15