

ФОРМУЛА ШЕЗИ ДЛЯ РАВНОМЕРНОГО АЭРИРОВАННОГО ПОТОКА

Уапова Жанар Кайраткызы, Аульбек Айжан Канатовна,
Толеген Арайлым Мураткызы

uapova_zh@mail.ru; arai.tolegen@bk.ru; aizhanaulbek@gmail.com

Студенты 2 курса специальности «Гидрология» ЕНУ им. Л.Н. Гумилёва, Нур-Султан,
Казахстан

Научный руководитель Тулегенов Ш.А.

При движении водного потока руслах (каналах) с большими уклонами при скорости больше некоторого значения начинается аэрация, которая изменяет структуру потока, ставит под сомнение надёжность расчётных известных формул гидравлики. В настоящее время проблема воздухововлечения остаётся ещё до конца неразрешённой. В данной работе на основе теоретических и экспериментальных исследований предложена зависимость для определения средней скорости аэрированного потока.

Для количественной характеристики аэрированного потока используются безразмерные коэффициенты, характеризующие воздухо- или водосодержание в объёме смеси.

Местная объёмная концентрация воздуха S_a аэрированного потока (коэффициент объёмного водосодержания) – отношение объёма воздуха dW_a к объёму смеси в элементарном объёме:

$$S_a = \frac{dW_a}{dW_{см}}$$

Местная объёмная концентрация воды S_w аэрированного потока (коэффициент объёмного водосодержания) – отношение объёма воды dW_w к объёму смеси в элементарном объёме:

$$S_w = \frac{dW_w}{dW_{см}}$$

Аэрированный поток представляем состоящим из двух областей (слоёв): нижний слой - область потока водо-воздушной (водно-пузырьковой) смеси, в которой количество водной фазы преобладает над количеством несомой – воздушной фазы и в которой жидкой фазе присуща решающая роль в передаче напряжений от слоя к слою; верхний слой – эта область воздушно- водной (воздушно-капельной) смеси, в которой количество воздушной фазы преобладает над количеством жидкой фазы. При этом в качестве поверхности раздела (свободной поверхности водо-воздушного или нижней границей воздушно-водного потоков) между этими областями принимается поверхность с 50% объёмной концентрацией воздушной (водной) фазы. Такая условность приводит к практически вполне приемлемым результатам. Одной из оснований для такого выделения границы – это то, что при содержании воздуха менее (45 – 50)% в смеси, «вода – воздух» осуществляется гидростатическая передача давления воды по глубине – свойство, характерное именно для жидкости. Для нашей задачи такой выбор положения условной границы важен потому, что в

силу достаточной симметрии эпюры воздухо содержания потока по отношению к этой границе (объёмные расходы воды и воздуха по нормали к этой границе равны при любых изменениях толщины аэрированного слоя) представляется возможность использовать уравнение неразрывности для воздушного и водного потоков, не нарушая баланс скоростей и расходов.

Выделим часть аэрированного потока длиной l , ограниченную сечениями 1-1 и 2-2 (Рис.1). Ось x направим по течению жидкости в русле. Учитывая, что движение жидкости равномерное, сумму проекций всех внешних сил на ось x приравняем нулю. Рассмотрим силы, действующие на выделенную часть потока.

а) Собственный вес выделенного отсека G . Принимая во внимание симметричность эпюры воздухо содержания (водосодержания) относительно поверхности с концентрацией 0,5

$$G = \omega_w l \gamma_w^o,$$

где ω_w - площадь живого сечения водо-воздушного слоя;

γ_w^o - удельный вес воды.

Проекция G на ось x равна:

$$G_x = \omega_w l \gamma_w^o i, \quad (1)$$

где $i = \sin \Theta$ уклон русла, который при равномерном движении потока равен гидравлическому уклону.

б) Силы давления P_1 и P_2 давления на торцевые сечения рассматриваемого отсека. При равномерном движении силы P_1 и P_2 равны по абсолютной величине, противоположны по направлению и могут быть исключены из рассмотрения.

в) Проекция на ось x сил нормального давления на боковую поверхность потока со стороны поверхности русла равна нулю.

г) Сила трения T_o , приложенная со стороны поверхности русла, направлена против течения и проектируется на ось x без искажения:

$$T_o = \tau_o \chi_o l = \tau_w \chi_w l + \tau_a \chi_a l, \quad (2)$$

где τ_w, τ_a - средние напряжения трения по поверхности русла соответственно в водо-воздушном и воздушно-водном слое;

χ_w - длина контура поперечного сечения водо-воздушного слоя, граничащего с поверхностью русла (для прямоугольного сечения $\chi_w = B + 2H$);

χ_a - длина контура поперечного сечения воздушно-водного слоя, граничащего с поверхностью русла (для прямоугольного сечения $\chi_a = 2h_a$);

д) Силы сопротивления, действующие на водные капли со стороны воздушного потока в воздушно-водном слое. В общем случае при движении частицы (водной капли) в газовом потоке на неё действуют силы различной природы [1]. К гидромеханическим силам, обусловленным взаимодействием частиц с воздушным потоком, относятся силы сопротивления давления и трения, силы, возникающие вследствие градиентности воздушного потока (создаваемые продольными и поперечными перепадами давлений и температур), в том числе – инерционные силы, связанные с ускорением или замедлением частицы. К массовым относятся силы, обусловленные внешними физическими полями (гравитационным, электромагнитным, электростатическим и др.), а также силы, действующие на частицы при движении по криволинейным траекториям или при их вращательном движении. В рассматриваемом случае гидромеханическую природу имеют и

силы, связанные с циркуляционными движениями внутри водных капель. Перечисленные силы в общем случае нестационарны, а степень их воздействия на частицу различна и зависит от её относительного размера, структуры потока газа и его режимных параметров. Поэтому, в решаемой задаче, основываясь на результатах экспериментальных исследований / 2 /, при оценке влияния воздушного потока на водные капли, принимаем во внимание только силу аэродинамического сопротивления. Приведенные в литературе сведения о взаимодействии дисперсной и дисперсионной фаз в большинстве случаев относятся к одиночным частицам и для частных случаев.

Сила аэродинамического сопротивления, возникающая при обтекании одиночной водной капли воздушным потоком равна:

$$F^o = C_{\mu}^o \rho_a^o \frac{\pi d_3^2}{4} \frac{\Delta U^2}{2}, \quad (3)$$

где C_{μ}^o - коэффициент сопротивления;

ρ_a^o - плотность дисперсионной фазы (воздуха);

ΔU - относительная скорость водной капли и воздушного потока;

d_3 - эквивалентный по объёму капли диаметр сферы.

При групповом движении водных капель указанная проблема с учётом их дробления, слипания и взаимного влияния чрезвычайно усложняется, а опытные данные отсутствуют. Кроме того, в реальном аэрированном потоке относительная скорость ΔU переменна. Водная капля, выброшенная в воздушно-водный слой и обтекаемая воздушным потоком, тормозится и возвращается в водо-воздушный слой, потеряв часть своей первоначальной скорости. Тем не менее, допускаем, что основные эффекты, имеющие место в воздушно-водном слое аэрированного потока, описываются формулами, полученными при обтекании одиночной частицы, с соответствующими поправками.

Используя (3), проекцию на ось x результирующей силы, действующей на все частицы (капли) выделенного отсека воздушно-водного слоя, можно выразить следующей зависимостью:

$$F_x = k \bar{C}_{\mu} \gamma_a^o \omega_a l \frac{\bar{S}_w^a}{d_3} \frac{\Delta \bar{U}^2}{2g}, \quad (4)$$

где k - коэффициент пропорциональности, включающий постоянные величины и учитывающий осреднение рассматриваемых характеристик аэрированного потока;

\bar{C}_{μ} - эквивалентный коэффициент сопротивления;

γ_a^o - удельный вес воды;

ω_a - площадь нормального сечения воздушно-водного слоя;

$\Delta \bar{U}$ - средняя относительная продольная скорость воздушной и водной фаз;

\bar{S}_w^a - средняя концентрация водной фазы в воздушно-водном слое.

Сумма проекций всех внешних сил на ось x равна:

$$G_x - T_o - F_x = 0 \quad (5)$$

Подставляя в (5) выражения (1), (2), (4), после преобразований получим:

$$RJ = \frac{\tau_w}{\gamma_w^o} + \frac{\tau_a}{\gamma_w^o} \frac{\chi_a}{\chi_w} + k \bar{C}_\mu \frac{\gamma_a^o}{\gamma_w^o} \frac{B}{\chi_w} \frac{h_a}{d_э} \bar{S}_w^a \frac{\Delta \bar{U}^2}{2g}, \quad (6)$$

где $R = \omega_w / \chi_w$ - гидравлический радиус водо-воздушного слоя;

J - гидравлический уклон; B и h_a - соответственно ширина и глубина воздушно-водного слоя.

Очевидно, второе слагаемое в правой части выражения (6) по величине в сравнении с остальными незначительно, поэтому им можно пренебречь; тем не менее его влияние учитываем коэффициентом k .

Традиционно первое и третье слагаемое в правой части зависимости (6) выражаем через коэффициенты гидравлического трения и скоростной напор, т.е.

$$RJ = \frac{\lambda_w}{4} \frac{U_w^2}{2g} + \frac{\lambda_n}{4} \frac{B}{\chi_w} \frac{U_w^2}{2g}, \quad (7)$$

где $\lambda_n = k \bar{C}_\mu \frac{\gamma_a^o}{\gamma_w^o} \bar{S}_w^a \frac{h_a}{d_э} \left(\frac{\Delta \bar{U}}{U_w} \right)^2$ - коэффициент гидравлического трения воздушно-

водного слоя;

λ_w - коэффициент гидравлического трения водно-воздушного слоя.

Из выражения (7) получим формулу средней скорости аэрированного потока:

$$U_w = \sqrt{\frac{8g}{\lambda_w + \lambda_n B / \chi_w}} \sqrt{RJ} \quad (8)$$

Анализируем величины, входящие в λ_n . Согласно формуле Боровкова В.С. величина \bar{S}_w^a (2) постоянна. Действительно,

$$\bar{S}_w^a = 1 - 0,5 \int_0^1 \left(1 + \operatorname{erf} \frac{z}{h_a} \right) d \left(\frac{z}{h_a} \right) = 0,255 \quad (9)$$

Экспериментальные исследования [2, 3] показали, что воздушно-водном слое аэрированного открытого потока значения величин $\frac{\Delta \bar{U}}{U_w}$, \bar{C}_μ , $d_э$ изменяются

несущественно. Таким образом, величина λ_n в основном определяется значением h_a - высотой выброса капель воды в надводное пространство. Согласно М.Кенна [4] вовлечение воздуха в высокоскоростные потоки (равно как и выбросы водных капель) определяются главным образом силами вязкости и поверхностного натяжения, которому соответствует определяющий критерий в виде $\sigma / \mu U_w$; где σ - коэффициент поверхностного натяжения; μ - коэффициент динамической вязкости воды; U_w - скорость водного потока. Исходя из этого, коэффициент λ_n предлагается определять в зависимости от этого критерия,

представляющего комбинацию критериев Вебера и Рейнольдса. На основе экспериментальных исследований получена эмпирическая зависимость:

$$\lambda_n = \left[\exp \left(0.1 \frac{\sigma}{\mu U_w} + 4.5 \right) \right]^{-1}$$

Список использованных источников

1. Дейч М.Е., Филиппов Г.А. Газодинамика двухфазных сред. - М.: Энергоиздат, 1981. – 472с.
2. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. – М.: Стройиздат, 1979. – 347с.
3. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие. - М.: Энергоатомиздат, 1988. – 624с.
4. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 392с.