



МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ И РАЗВИТИЯ КАВИТАЦИИ ИНЖЕНЕРНЫХ ТРУБОПРОВОДАХ

Xayrullayev Rahmatillo Saydullayevich¹, Xudoyqulov Savet Eshonqulovich², Navruzov Shavkat Normatovich³

¹Toshkent arxitektura qurilish instituti Докторант(PhD).

²Irrigatsiya va suv muammolari ilmiy tekshirish instituti Texnika fanlari doktori.Professor

Urganch Davlat Universiteti mustaqil izlanuvchi (PhD)

³Ташкентский институт текстильный и лёгкий промышленности, доцент кафедры иностранных языков.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.6379392>

ИСТОРИЯ СТАТЬИ

Принято: 01 марта 2022 г.

Утверждено: 10 марта 2022 г.

Опубликовано: 14 марта 2022 г.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

искусственная песчаная шероховатость, кавитационная опасность, распределение концентрации по глубине, среднеквадратическое расстояние.

Определяется распределение концентрации по глубине аэрированного потока на быстротоке. Порядок расчета аэрации потока в открытом русле строится кривая свободной поверхности без учета аэрации и определяется створ начала аэрации. Дается концентрация распределения и расчёт осаждаемых частиц дна.

Основная часть: Местная концентрация воздуха в воздушно-

АННОТАЦИЯ

«Моделирование распределение концентрации и развития кавитации инженерных трубопроводах» Приводится поверхности раздела, которая зависит от частоты и высоты выброса капель в атмосферу и находится площади этой поверхности на рассматриваемый уровень. Определяется распределение концентрации по глубине аэрированного потока на быстротоке. Порядок расчета аэрации потока в открытом русле строится кривая свободной поверхности без учета аэрации и определяется створ начала аэрации. Дается концентрация распределения и расчёт осаждаемых частиц дна.

капельной области водохранилище, т. е. выше поверхности раздела, зависит от частоты и высоты выброса капель в атмосферу с единицы площади этой поверхности на рассматриваемый уровень. Высота выброса капель воды отсчитывается от поверхности раздела и изменяется от $y^* = 0$ до некоторого значения $y^* = y_{\text{макс}}^*$. Экспериментально установлено, что частота просачивания каплями воды

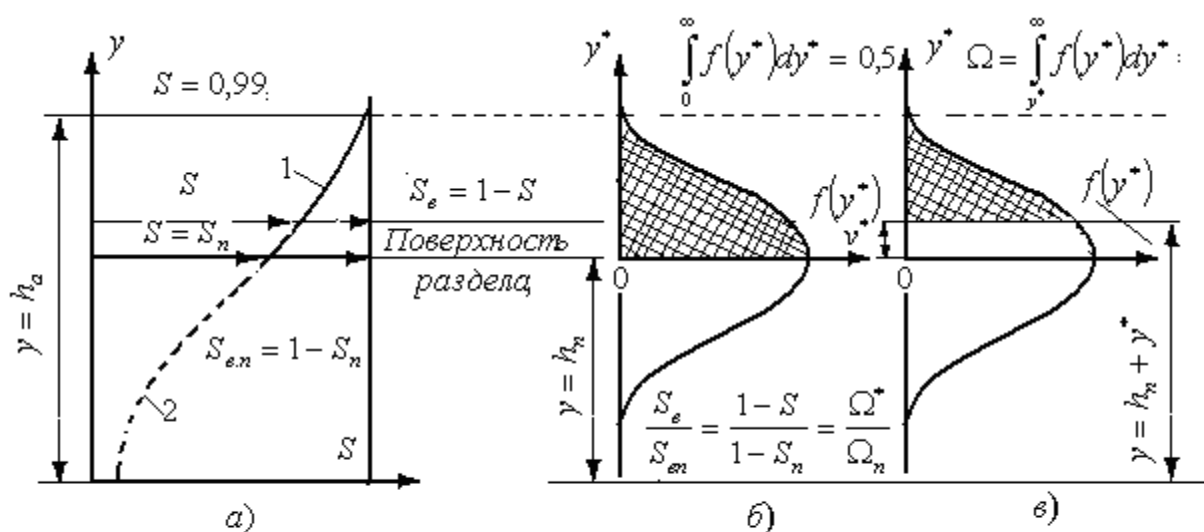


Рис.1. К выводу формулы распределения концентрации воздуха в аэрированном потоке. 1- $S = f(y)$ в воздушно-капельной области формула (2)
 2-то же в водовоздушной области формула (5).

различных уровней y^* починается нормальному закону распределения вероятностей, и может быть

представлена половиной кривой нормального распределения вероятностей:

$$f(y^*) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y^*}{\sigma} \right)^2} \quad (1)$$

где $y^* = y - h_n$; σ - среднеквадратическое расстояние, на которое выбрасываются капли с поверхности раздела. Приняв этот закон, получим в соответствии со свойствами кривой распределения $y_{\max}^* = \infty$. На рис.1,а показана кривая концентрации воздуха и на рис.1, б, в

принятые кривые распределения воды на различных уровнях выше поверхности раздела.

Концентрация воды S_e на любом уровне y^* пропорциональна площади, ограниченной кривой распределения, лежащей выше заданного уровня, т. е.

$$\Omega^* = \int_{y^*}^{\infty} f(y^*) dy^* \quad (\text{рис.1, в}). \quad \text{Так как}$$

$$\text{то} \quad \Omega^* = \int_{y^*}^{\infty} f(y^*) dy^* = 0,5; \quad \text{это}$$

кривая нормального распределения вероятностей ограничивает, как известно, площадь, равную единице,

пропорционально концентрации на уровне $y^* = 0$. Следовательно,

$$\frac{S_6}{S_{6,n}} = \frac{\int_{y^*}^{\infty} f(y^*) dy^*}{\int_0^{\infty} f(y^*) dy^*} = \frac{\int_{y^*}^{\infty} f(y^*) dy^*}{0,5}$$

$$\frac{1-S}{2(1-S_{II})S_{6,n}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{y^*}^{\infty} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y^*}{\sigma}\right)^2} dy^* \quad (2)$$

Для области аэрированного потока, находящейся ниже поверхности раздела, процесс проникновения пузырьков воздуха в поток, в его

водо-воздушную область, в [1] рассматривают как процесс диффузии. Перенос некоторой субстанции при

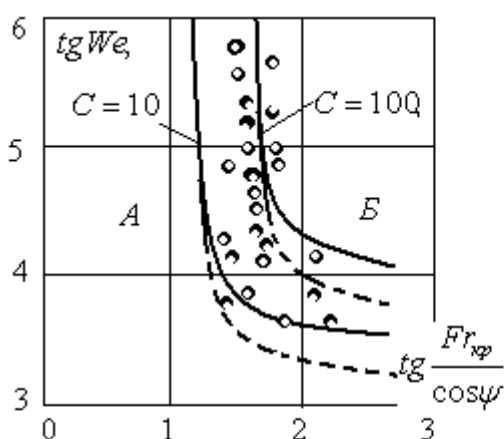


Рис.2. Влияние поверхностного натяжения число Вебера We на число Фруда Fr_{xp} соответствующее началу аэрации.

— для дистиллированной воды
 --- для воды с органическими примесями.
 ○ ○ опытные точки.

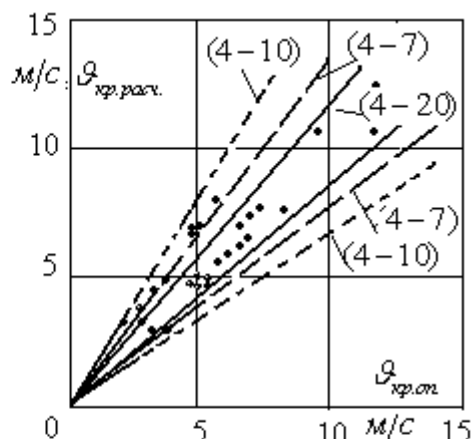


Рис.3. Среднеквадратические отклонения расчётных значений скорости начала аэрации от опытных данных. • • натурные данные; • лабораторные данные.

Применительно к равномерному аэрированному потоку по аналогии с турбулентной вязкостью:

$$\epsilon_6 = \beta \chi \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \left(\frac{h_{II} - y}{h_{II}} \right) y$$



где $\sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} = u_*$ - динамическая скорость;

χ - постоянная Кармана; h_{Π} - расстояние от дна до поверхности раздела; β - коэффициент

пропорциональности, связывающий турбулентную вязкость с турбулентной диффузией.

После подстановки ϵ_s в (3) и интегрирования

$$\ln\left(\frac{y}{h_{\Pi} - y}\right)^k = \ln S + \ln C$$

Постоянная интегрирования C

находится из условия: при $y = \frac{h_{\Pi}}{2}$

концентрация $S = S_{\frac{h_{\Pi}}{2}}$, откуда:

$$S = S_{\frac{h_{\Pi}}{2}} \left(\frac{y}{h_{\Pi} - y} \right)^k \quad (4)$$

где $k = \frac{w}{\beta \chi u_*}$.

Формулы (2) и (4) показывают хорошее совпадение с опытными данными, но использовать их можно только при известных S_{Π}, σ, h_{Π} и $S_{\frac{h_{\Pi}}{2}}$.

В. П. Троицкий [4] на основании анализа опытных данных предложил (4) заменить формулой:

$$\frac{S}{S_{\Pi}} = \exp\left[-k\left(1 - \frac{y}{h_{\Pi}}\right)\right] \quad (5)$$

и неизвестные параметры S_{Π}, σ, h_{Π} определять при помощи безразмерного комплекса $\bar{\Pi}$:

$$\bar{\Pi} = \left(\frac{\bar{R}}{\bar{h}}\right)^{1,2} \left(\frac{\bar{\delta}_R}{\bar{R}}\right)^{0,25} \bar{F}r_{R,\psi} \quad (6)$$

где $\bar{F}r_{R,\psi} = \frac{\bar{g}^2}{g\bar{R} \cos\psi}$ - число Фруда аэрированного потока, учитывающее угол наклона русла;

$\bar{\delta}_R = \frac{3,3\bar{R}}{Re_{*R}} + \Delta_s$ характеристика шероховатости дна и стенок русла;



здесь и, стенок русла; здесь

$$\overline{Re}_{*R} = \frac{u_* \bar{R}}{\nu} = \frac{\bar{R}}{\nu} \sqrt{g \bar{R} i} \quad - \quad \text{число}$$

Рейнольдса; Δ_s - эквивалентная абсолютная шероховатость.

Черта над $\bar{F}r, \bar{R}, \bar{\delta}_R$ показывает, что эти величины определяются для

$$6,45 \left(1 + 2 \frac{h}{b} \right)^{-1} \frac{h^3}{\delta_R^{0,125} h_{кр}^{2,875}} = \xi^{1,375} \left(1 + 2 \frac{h_{кр}}{b} \xi \right)^{-0,975} \quad (7)$$

где h, b - глубина и ширина потока, определенные без учета аэрации; δ_R вычисляется

по R и Re_{*R} неаэрированного потока.

Если $\bar{h} = \xi h_{кр}$ окажется больше h или примерно равным ему (с погрешностью 3%), то дальнейший расчет ведется по $\Pi = \bar{\Pi}$; $\bar{\Pi}$

$$4,03 \left(1 + 2 \frac{h}{b} \right)^{-1,5} \frac{h^{4,5}}{\delta_R^{0,125} h_{кр}^{4,375}} = \xi^{2,875} \left(1 + 2 \frac{h_{кр}}{b} \xi \right)^{-1,475} \quad (8)$$

При найденном $\bar{\Pi}$ расчет концентрации S в любой точке потока ниже поверхности раздела ведется по (5), выше поверхности - по (2). Входящие в эти формулы

Таблица для определения параметров, входящих в формулы (2) и (5) для расчета аэрированного потока

потока некоторой фиктивной глубины $\bar{h} = \xi h_{кр}$, которая далее называется *приведенной глубиной* (см. рис.1,3,а); $h_{кр}$ - критическая глубина неаэрированного потока. Коэффициент ξ - вычисляется первоначально по формуле:

определяется по (6) по исходным значениям для неаэрированного потока.

Если $\bar{h} < h$, то рассматриваются два расчетных случая:

- 1) $71 \leq \bar{\Pi} \leq 280$ - в расчет вводится найденный \bar{h} ;
- 2) $\bar{\Pi} > 280$ - \bar{h} - вычисляется заново по формуле

величины S_{Π}, k, σ и h_{Π} определяются по известной величине $\bar{\Pi}$ согласно табл.1, в которой приведены формулы для определения вспомогательных величин $\bar{S}, \bar{S}_{\Pi}, \bar{R}_{\Pi}, \bar{h}_{\Pi}$ и $\bar{\lambda}_R$.

Таблица 1

Слабо и умеренно аэрированный поток	Значительно аэрированный поток	
	$71 \leq \bar{\Pi} \leq 280$	$\bar{\Pi} > 280$
$\lg \bar{S} = 0,6 \lg \bar{\Pi} - 1,33$		
$\bar{S}_n = \bar{S}^2$		



$k = 390\bar{\Pi}^{-1,332}$	$\bar{S} = 0,295\bar{\Pi}^{0,167}$	$\lg \bar{S} = 0,5 \lg \bar{\Pi} - 0,250$
При $\bar{\Pi} \leq 32$	$\bar{S}_n = 0,0922\bar{\Pi}^{0,333}$	$\lg \bar{S}_n = 0,10 \lg \bar{\Pi} - 0,460$
$\bar{S}_n = 0,5, R/\bar{R}_n \approx 1$	$k = 10,35\bar{\Pi}^{-0,5}$	$k = 4,03\bar{\Pi}^{-0,333}$
$h/\bar{h}_n \approx 1; h/h_n \approx 1;$	$\bar{S}_n = 1 - 1,62\bar{\Pi}^{-0,333}$	$S_n = 1 - 1,01\bar{\Pi}^{-0,25}$
$\sigma \approx 0,0087h\bar{\Pi}$	$\lg R/\bar{R}_n = 0,21 \lg \bar{\Pi} - 0,295$	$tg R/\bar{R}_n = 0,10 tg \bar{\Pi} - 0,050$
При $32 < \bar{\Pi} < 71$	$\lg \sigma/\bar{h} = 0,45 \lg \bar{\Pi} - 1,2$	$\lg \sigma/\bar{h} = 0,30 \lg \bar{\Pi} - 0,833$
$\bar{S}_n = 1 - 1,62\bar{\Pi}^{-0,333}$		
$tg R/\bar{R}_n = 0,21 \lg \bar{\Pi} - 0,295$		
$\lg \sigma/\bar{h} = 0,45 \lg \bar{\Pi} - 1,2$		
$\bar{R}_n = \frac{b\bar{h}_n}{b + 2\bar{h}_n} \quad h_n = \frac{\bar{h}_n}{1 - \bar{S}_n}$		

Чем больше насыщение потока воздухом, тем большее значение принимает комплекс $\bar{\Pi}$. При $\bar{\Pi} \leq 71$ поток аэрирован слабо или умеренно, пузырьки воздуха не достигают дна, аэрация не оказывает существенного влияния на потери напора.

При $\bar{\Pi} > 71$ насыщение потока воздухом значительное, воздух проникает до дна, что заметно

сказывается на потерях напора и глубине аэрированного потока.

Порядок расчета аэрации потока в открытом русле следующий:

- 1) строится кривая свободной поверхности без учета аэрации;
- 2) определяется створ начала аэрации по (1-3), (1-5) или по формуле:

$$g_{kp} = 6,63 \sqrt{gR \cos \psi \left(1 + \frac{0,0011}{R^2} \right)} \left(1 + 8,7 \frac{n}{R^{\frac{1}{6}}} \right)^{-1} \quad (9)$$



для чего строится кривая изменения скорости по длине русла;

3) для выбранных створов рассчитываются по (2) и (5) местная

Определять концентрацию воздуха по всей глубине потока при оценке возможности развития на дне кавитации и кавитационной эрозии не требуется. Для определения концентрации у дна достаточно при $\bar{P} > 711$ принять в формуле (5) $y = 0$.

На рис.4. сопоставлены результаты расчета по рассмотренной методике [4] с опытными данными, приведенными в [3]. Опыты проводились в лотке шириной 427,2 мм, с искусственной песчаной шероховатостью ($\Delta_s \approx 0,6 \text{ мм}$) при наклонах лотка 15 и 75° и расходе 181 л/с. Длина лотка более 15 м. По расчету при угле наклона лотка 15° концентрация воздуха у дна получилась меньше, чем по опыту. Эта погрешность идет в запас, так как при малой концентрации воздуха у дна требуется принятие

мер для защиты поверхности дна от кавитационной эрозии. В действительности наличие аэрации у дна уменьшает кавитационную опасность.

Заключение: Определить распределение концентрации по глубине аэрированного потока на быстротоке инженерных трубопроводах, шириной $b = 8,0 \text{ м}$ с уклоном дна $i = \sin \psi = \sin 40^\circ = 0,643$.

концентрация и глубина аэрированного потока, которая определяется уровнем заданной концентрации.

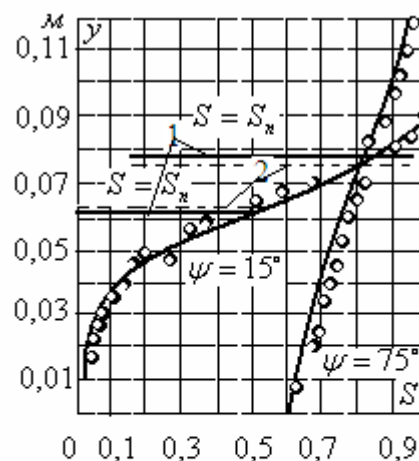


Рис.4. Сопоставление различных и экспериментальных значений местной концентрации воздуха по глубине потока 1- уровень поверхности раздела по расчёту, 2 — — — то же по опыту

Средняя скорость в исследуемом сечении $g = 40 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, глубина без учета аэрации $h = 1,0 \text{ м}$, эквивалентная шероховатость дна $\Delta_s \approx 0,003 \text{ м}$. Температура воды 15°C ($\nu = 1,14 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$). Распределение концентрации по глубине определяется по формулам (2) и (5). Величины, входящие в эти формулы (табл. 1), зависят от безразмерного комплекса \bar{P} (6).

Литературы:

1. Слисский С.М. Гидравлические расчёты высоконапорных гидротехнических сооружений. Москва «ЭНЕРГИЯ» 1979. 336с.



2. Каменев И. А. Аэрация потока, падающего с консольного водосброса. — Гидротехническое строительство, 1964, № 8, .
3. Исаченко Н. Б., Чанишвили А. Г. Изучение деформаций струй, отбрасываемых носком-трамплином от сооружения. — Известия ВНИИГ, 1968, т. 87.
4. Троицкий В.П. К расчету безнапорных аэрированных водных потоков.- Гидравлика и гидротехника №17.Киев: Техника,1973.
5. Khudaykulov S.I., Yakhshibaev D.S., Usmonov A.H., Nishonov F. Kh. Change in concentration of collector waters along the flow length taking into account the difference in densities http://dx.doi.org/10.26739/2433-202x_Issue_DOI_202x-209-2019-1 <http://dx.doi.org/10.26739/2433-202x39-43s> Asian Journal of Research ¹ 1-3, 2019 ISSN 2433-202x39-43s.