

Бальчугов Алексей Валерьевич,

д.т.н., профессор кафедры МАХП, Ангарский государственный технический университет,

email: balchug@mail.ru

Левин Максим Максимович,

магистрант гр. ТМм-24, Ангарский государственный технический университет,

email: nir@angtu.ru

РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СТРУЙНЫХ АЭРАТОРОВ

Balchugov A.V., Levin M.M.

CALCULATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS OF JET AERATORS

Аннотация. Рассмотрены методы расчета гидродинамических параметров струйных аэраторов: глубины погружения струи, объема аэрируемой зоны, коэффициента эжекции. Получены результаты расчета для конкретных условий аэрации.

Ключевые слова: аэрация, струя, гидродинамика, методика расчета, коэффициент эжекции.

Abstract. The article considers methods for calculating hydrodynamic parameters of jet aerators: jet immersion depth, volume of aerated zone, ejection coefficient. The calculation results for specific aeration conditions are obtained.

Keywords: aeration, jet, hydrodynamics, calculation method, ejection coefficient.

Процесс струйной аэрации применяется при биологической очистке воды [1]. Струйная аэрация позволяет насытить воду кислородом, необходимым для жизнедеятельности микроорганизмов, перерабатывающих содержащиеся в воде вредные вещества.

Принцип действия струйного аэратора (рис. 1) состоит в следующем. Струя воды 2 под напором вытекает из патрубка 1 и с некоторой высоты l падает на поверхность неподвижного слоя воды 3.

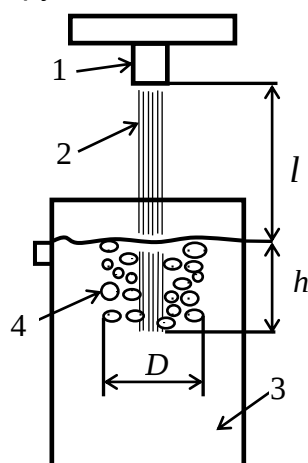


Рисунок 1 – Струйный аэратор: 1 – патрубок; 2 – струя воды; 3 – слой воды; 4 – аэрируемая зона.

При падении струи 2 захватывает некоторое количество воздуха и погружается вместе с ним в слой воды на глубину h . По мере погружения пузырьки воздуха теряют скорость и на глубине h начинают всплывать. Образующаяся аэрируемая зона (газожидкостный слой) представляет собой по форме цилиндр 4 с диаметром D и объемом V . Наиболее важными гидродинамическими параметрами, определяющими эффективность аэрации, являются: глубина проникновения падающей струи в жидкость h (м); диаметр D (м) и объем V (м³) аэрируемой зоны; количество воздуха, захваченное струей воды V_1 (м³/с) или коэффициент эжекции K (м³/м³).

Целью работы является обзор и апробация имеющихся в литературе эмпирических зависимо-

стей для расчета основных гидродинамических параметров струйного аэратора.

Глубина проникновения падающей струи в жидкость растет с увеличением радиуса патрубка, с ростом скорости жидкости в патрубке и с возрастанием высоты свободного падения струи (расстоянием между выходным сечением патрубка и поверхностью жидкости). В работе [1] (цит. по [2]) приведена эмпирическая формула для определения глубины проникновения падающей струи в жидкость (струя круглого сечения):

$$\frac{h}{r} = 15,5 \cdot Fr^{1/3}, \quad (1)$$

где h – глубина проникновения падающей струи в жидкость, м; r – радиус патрубка, м; Fr – критерий Фруда.

Критерий Фруда:

$$Fr = \frac{w^2}{g \cdot r}, \quad (2)$$

где w – скорость жидкости в патрубке, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с².

В [3] (цит. по [2]) приводится другая эмпирическая формула для определения глубины проникновения падающей струи в жидкость:

$$h = 2,6 \cdot (w \cdot d)^{0,7}, \quad (3)$$

где d – диаметр патрубка, м.

Формула для расчета глубины проникновения струи, приведенная в работе [4], имеет вид:

$$h = 0,25 \cdot (m \cdot w)^{1/3}, \quad (4)$$

где m – массовый расход воды в струе, кг/с. По данным авторов [4], формула (4) описывает опытные данные с погрешностью $\pm 12\%$.

На рисунке 2 приведены результаты расчета глубины проникновения струи в жидкость по формулам (1), (3) и (4) при различных скоростях истечения из патрубка круглого сечения диаметром $d=0,004$ м. Расчет глубины проникновения струи по уравнениям (1), (3), (4) дает значения, отличающиеся друг от друга на 0,09-11,0 %.

Другим важным параметром работы струйного аппарата является диаметр аэрируемой зоны (рис. 1) [5]. В работе [4] установлено, что диаметр аэрируемой зоны составляет:

$$D = 0,44 \cdot h. \quad (5)$$

Тогда объем аэрируемой зоны, имеющей форму цилиндра:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot h = 0,152 \cdot h^3. \quad (6)$$

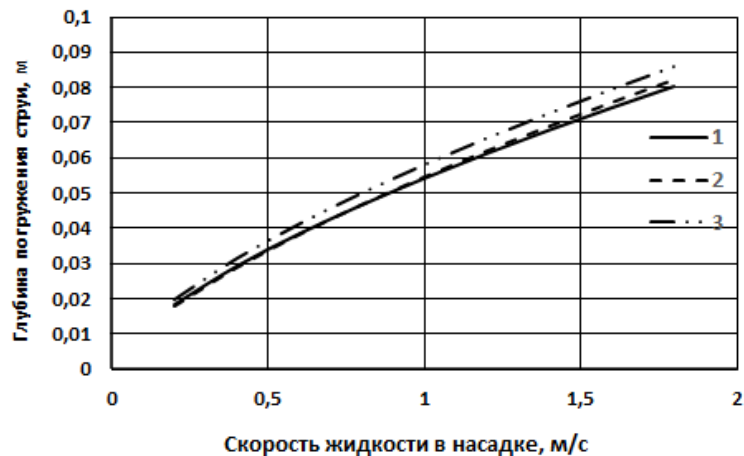


Рисунок 2 – Результаты расчета глубины погружения струи:
1 – по формуле (1); 2 – по формуле (3); 3 – по формуле (4).

На рисунке 3 представлены результаты расчета объема зоны аэрирования по формуле (6) с использованием формул (1, 3, 4) для расчета глубины проникновения струи при различных скоростях истечения из патрубка круглого сечения диаметром $d=0,004$ м.

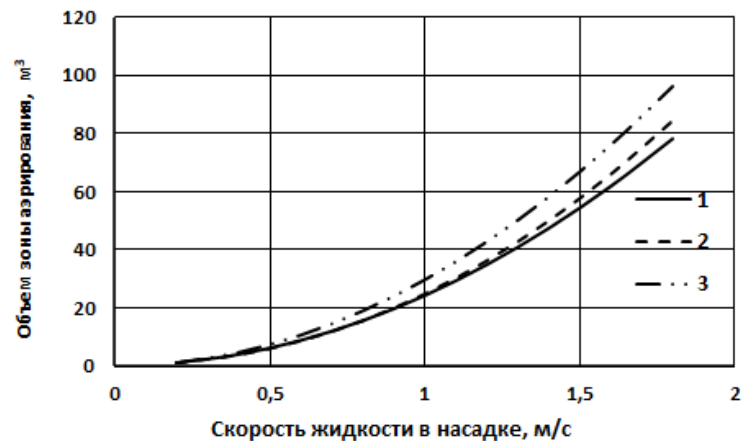


Рисунок 3 – Результаты расчета объема зоны аэрирования:
1 – по формулам (6, 1); 2 – по формулам (6, 3); 3 – по формулам (6, 4).

Разброс результатов расчета объема зоны аэрирования (рис. 3) составляет 0,26-29,0 %.

Эффективность аэрации характеризуется также коэффициентом эжекции, который представляет собой количество воздуха ($м^3$), эжектированное одним кубическим метром воды:

$$K = \frac{V_1}{V_2}, \quad (7)$$

где V_1 – объемный расход воздуха, захваченного струей, $м^3/с$; V_2 – объемный расход воды, $м^3/с$.

В работе [1] (цит. по [2] и по [6]) получено следующее критериальное уравнение для определения коэффициента эжекции:

$$K = 1,56 \cdot 10^{-6} \cdot (\text{Re} \cdot \sqrt{Fr})^{\frac{3}{4}} \cdot \left(\frac{l}{r}\right)^{\frac{3}{4}}, \quad (8)$$

где Re – критерий Рейнольдса течения воды в патрубке; l – высота падения струи (длина струи, или расстояние от отверстия патрубка до поверхности жидкости), m .

Критерий Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (9)$$

где μ – коэффициент динамической вязкости жидкости, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ρ – плотность воды, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В работе [7] (цит. по [6]) приведена другая эмпирическая формула для расчета коэффициента эжекции:

$$K = 0,75 \cdot \text{We}^{1,09} \cdot \text{Re}^{-0,85} \cdot \text{Fr}^{-0,447} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,728}, \quad (10)$$

где We – критерий Вебера:

$$\text{We} = \frac{\rho \cdot d \cdot w^2}{\sigma}, \quad (11)$$

σ – коэффициент поверхностного натяжения, $\text{Н}/\text{м}$.

В работе [8] рекомендуется иная формула:

$$K = 0,06 \cdot \text{We}^{0,33} \cdot \text{Fr}^{0,08} \cdot \text{Re}^{-0,25} \cdot \left(\frac{l}{d}\right)^{0,66}. \quad (12)$$

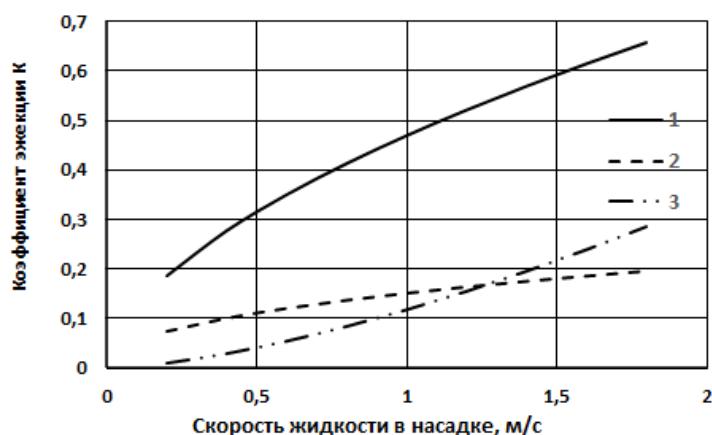


Рисунок 4 – Результаты расчета коэффициента эжекции K по известным зависимостям для $d=0,004 \text{ м}$, $l=0,2 \text{ м}$:

1 – формула (12); 2 – формула (8); 2 – формула (10).

Из рисунка 4 видно, что результаты расчета коэффициента эжекции по разным формулам существенно отличаются. Это объясняется, по-видимому,

сложностью процесса захвата воздуха струей, характер которого в значительной мере определяется вероятностными процессами развития возмущений на поверхности струи [9].

По нашему мнению, перспективным направлением экспериментальных исследований остается получение эмпирических зависимостей для расчета основных гидродинамических параметров струйных аэраторов с патрубками различного сечения (круглыми, овальными, щелевидными, кольцевыми, спиральными и др.) с учетом фундаментальных закономерностей процесса. Это позволит разработать надежные методы расчета аэраторов, работающих с аэробными группами микроорганизмов, для жизнедеятельности которых необходим постоянный приток кислорода [10].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Русаков В.Е.** Исследование процесса аэрации струй, поступающих в нижний бьеф гидросооружений. Дисс. канд. техн. наук / Русаков В.Е. – М., 1958. 120 с.
2. **Фомин Д.П., Заславский Ю.А.** Моделирование процесса струйной аэрации жидкости // Успехи современного естествознания, 2004. – №4. – С. 77-78.
3. **Попкович Г.С., Репин Б.Н.** Системы аэрации сточных вод. – М.: Стройиздат, 1986. – 150 с.
4. **Яблокова М.А., Соколов В.Н., Сугак А.В.** Гидродинамика и массоперенос при струйном аэрировании жидкостей // Теоретические основы химической технологии, 1988. – № 6. – С. 734-739.
5. **Лапшин А.А.** Гидродинамика и массоперенос при инжекционном аэрировании жидкости. Автореферат дисс. канд. техн. наук / Лапшин А.А. – Санкт-Петербург: СПбТИ, 1994. – 20 с.
6. **Щербакова М.К.** Теоретические основы процесса аэрации жидкости незатопленной струей // Сборник материалов международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири». – Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет, 2014. – С. 148-152.
7. **Oyama, Y.** Induction of air by jet streams / Y. Oyama, Y. Takashima, H. Idemura. – Kagaku Kenkyusko Hokoku, 1953. – 344 p.
8. **Фетисов Ю.М.** Захват воздуха при взаимодействии струи с покоящейся жидкостью. Автореферат дисс. канд. техн. наук / Фетисов Ю.М. – М., 1995. – 24 с.
9. **Grant, R. P.** Newtonial jet stability / R.P. Grant, S. Middleman // AICh.E.J. – 1966. – Vol. 12. – № 4. – P. 669–677.
10. **Сидорова Л.П., Снигирева А.Н.** Очистка сточных и промышленных вод. Часть II. Учебное пособие. – Екатеринбург: Уральский Федеральный университет им. Б.Н. Ельцина, 2017. – 127 с.