

УДК 628.356.3

Е.И.ДМУХАЙЛО (БИСИ), В.Г.ОВСЯНИКОВ,  
канд. техн. наук (БПИ), Н.В.ВАСИН,  
канд. техн. наук (БИСИ)

### МАССОПЕРЕДАЧА КИСЛОРОДА ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ СТРУЙНОЙ АЭРАЦИИ

В последние годы струйная аэрация для биохимической очистки сточных вод вызывает большой интерес и находит промышленное применение [1, 2].

Наиболее полно изучена массопередача свободнопадающими струями на водосливах и в меньшей степени – свободными напорными струями, истекающими из различного типа насадок, конфузоров, работающих с существенной инверсией струи.

Большинство авторов изучали процесс вовлечения пузырьков, распределение их по размерам, объемный расход газа и возможные механизмы вовлечения в зависимости от различных параметров. Однако по массопередаче кислорода, как конечной цели процесса, имеется мало данных [3].

При струйной аэрации турбулентная струя жидкости проходит через воздух в заполненный жидкостью аэрационный резервуар, вовлекая при этом значительное количество воздуха и образуя водовоздушную смесь с большой площадью раздела фаз.

После выхода из насадка в окружающую среду свободная струя жидкости постепенно расширяется, скорость ее течения возрастает и на поверхности струи наблюдаются волнообразные возмущения.

Одновременно, захватывая с собой часть газа, струя образует газовую полость небольшой глубины, через дно которой входит в жидкость. Вследствие пульсаций волнового пограничного слоя происходит коллапс газовой полости, приводящий к образованию множества мелких первичных пузырьков, движущихся вниз и в стороны.

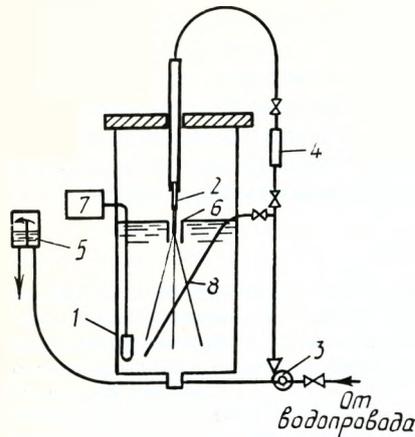


Рис. 1. Экспериментальная установка:  
 1 — колонна с прозрачной стенкой 0,5 x 0,5 x 1,5 м<sup>3</sup>; 2 — насадок; 3 — насос; 4 — ротаметр; 5 — подвижный водослив; 6 — направляющий насадок; 7 — анализатор растворенного кислорода; 8 — трубопровод струйного перемешивания

Наличие волн возмущения на поверхности жидкости, зависящих от масштаба установки и структуры газожидкостного потока, приводит к дискретности процесса вовлечения газа за счет изменения свободного для прохода газа сечения, а также его частичного захлопывания в момент прохождения волны. В результате множественной коалесценции первичных пузырьков образуются более крупные вторичные пузырьки, всплывающие к поверхности жидкости.

Таким образом, при струйной аэрации образуются две отличные друг от друга зоны пузырьков, для которых невозможно охарактеризовать распределение во времени и пространстве поверхностей раздела фаз. Поэтому массопередача может быть надежно рассчитана лишь с помощью таких независимых переменных систем, как расходы каждой из фаз, их физические свойства, параметры струй, геометрии струйных аэраторов.

При высоких скоростях истечения струи пузырьки внутри двухфазной области находятся в условиях интенсивной турбулентности, что приводит к полному насыщению жидкости кислородом. Учитывая это и пренебрегая массопередачей через поверхность жидкости в резервуаре, приходим к простому уравнению кислородного баланса

$$\frac{dC}{dt} = \frac{Q(C^* - C_t)}{W} \quad (1)$$

С другой стороны, в соответствии с основным уравнением массопередачи

$$\frac{dC}{dt} = Ka(C^* - C_t) \quad (2)$$

Приравнявая (1) и (2), имеем

$$KaW = Q.$$

В критерий массопередачи кислорода при струйной аэрации должен входить расход жидкости. Как показал анализ размерностей, отношение объем-

ного коэффициента массопередачи к расходу жидкости описывается следующим уравнением:

$$\frac{KaW}{Q} = f(Fr, \frac{h}{d}, Re, We, \alpha).$$

Так как физические свойства жидкости не изменялись в процессе опытов и угол наклона насадка в пределах  $30^\circ - 90^\circ$  не оказывал существенного влияния на массопередачу, критериальное уравнение массопередачи примет вид

$$\frac{KaW}{Q} = C \left( \frac{v^2}{gd} \right)^{\alpha_1} \left( \frac{h}{d} \right)^{\alpha_2}.$$

Объемный коэффициент массопередачи определялся по методу переменного дефицита кислорода

$$Ka = \frac{2,3 [l_g(C^* - C_1) - l_g(C^* - C_2)] K_r}{\Delta \tau}.$$

Поскольку в любой аэрационной системе существует градиент концентрации растворенного кислорода, то для повышения точности и воспроизводимости результатов измерений методика была модифицирована применительно к струйной аэрации, при которой имеет место локальный перенос кислорода и высокие скорости насыщения. Этот метод предусматривает измерения с переключением подачи воды от насадка в трубопровод струйного перемешивания, что позволяет получать для любого момента времени среднюю величину концентрации растворенного кислорода.

Используемая в настоящих исследованиях установка показана на рис. 1.

С целью стабилизации условий входа струи в жидкость, зависящих от соотношения параметров струи и объема установки, оказывающих влияние на массопередачу, в точке входа струи в жидкость устанавливался короткий направляющий насадок. Растворенный кислород измерялся анализатором АКВА-1.

Расходы воды определялись ротаметром. Применялись латунные насадки с  $l/d = 10$ , диаметром 5; 6,5; 9,5; 11,5 мм. Скорость истечения составляла 3–10 м/с, высота истечения – 5–15 см.

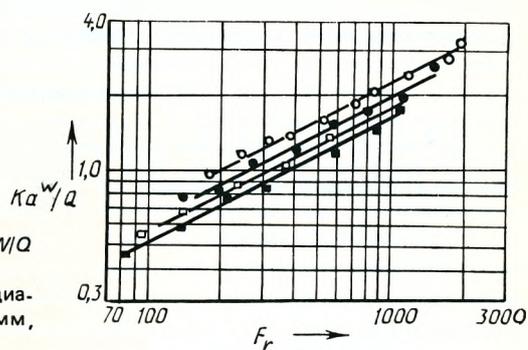
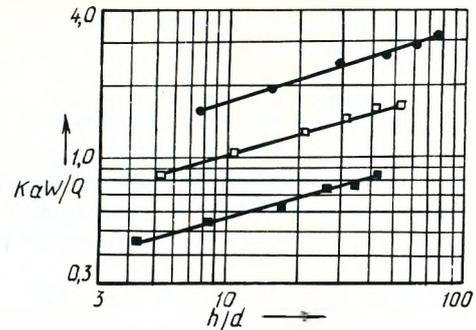


Рис. 2. Зависимость критерия  $KaW/Q$  от критерия Фруда  
Высота истечения струй – 10 см; диаметры насадков:  $\circ$  – 5 мм,  $\bullet$  – 6,5 мм,  $\square$  – 9,5 мм,  $\blacksquare$  – 11,5 мм

Рис. 3. Зависимость критерия  $KaW/Q$  от критерия  $h/d$ :  
 ● —  $d = 6,5$  мм,  $V = 8,15$  м/с; □ —  $d = 9,5$  мм,  $V = 5,7$  м/с; ■ —  $d = 11,5$  мм,  $V = 3,5$  м/с



Результаты измерений представлены на рис. 2 и 3. В окончательном виде уравнение массопередачи имеет вид

$$\frac{KaW}{Q} = 0,027F_r^{0,5} \left( \frac{h}{d} \right)^{0,3}. \quad (3)$$

Экспериментальные значения коэффициентов массопередачи аппроксимируются уравнением (3) с точностью  $\pm 7\%$ . Это уравнение может быть использовано для расчета струйных аэраторов с параметрами работы, лежащими в исследованной области.

Эффективность аэрации, как показали проведенные исследования, обратно пропорциональна скорости и достигает высоких значений при малых диаметрах и скоростях истечения струи.

Интересно отметить, что для поверхностных механических аэраторов, вовлекающих воздух струей жидкости, срывающейся с лопасти, эффективность аэрации лежит в пределах  $2-3$  кг  $O_2$ /кВт·ч, при оптимальных скоростях вращения  $3-5$  м/с, что согласуется с полученными данными для струй диаметром  $9,5-11,5$  мм. В целом при струйной аэрации не существует оптимальной скорости истечения. Скорости истечения будут диктоваться определенными уровнями массопередачи и перемешивания, применяемыми конструкциями струйных аэраторов и реакторов, насосного оборудования.

В результате исследований можно наметить некоторые пути интенсификации процесса массопередачи кислорода при поверхностной струйной аэрации. Массопередачу можно увеличить, используя раздробленную (с нарушенной сплошностью течения) струю, а также применяя многосопловые конструкции струйных аэраторов с малыми диаметрами выходных отверстий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин Я.А., Жуков Д.Д., Репин Б.Н. Очистка производственных сточных вод в аэротенках. — М., 1973. — 222 с. 2. Исследование работы аэратора струйного типа / Сальников Б.Ф., Караваев Н.И. // Тр. ин-та / ВОДГЕО. — 1980. — С. 23-25.