

большинства бактерий благоприятна нейтральная или слабощелочная реакция среды (6,5-8,5), для дрожжей и плесневых грибов - слабокислая. Большинство исследователей [4,6] отмечают максимальную скорость окисления загрязнений городских и промышленных сточных вод при рН равном 7-7,5.

В [7] было показано, что лимитирующая концентрация растворенного кислорода возрастает пропорционально величине  $S_e$ . Поэтому в случае высоких значений  $S_e$  увеличение содержания кислорода в реакторе может существенно увеличить скорость очистки [3].

Согласно [8] скорость изъятия субстрата характеризуется выражением:

$$\frac{dS}{d\tau} = -k_0 \cdot \gamma \cdot S_e, \quad (1)$$

$\gamma$  – множитель, характеризующий абсолютное снижение

концентрации загрязнения,  $\gamma = \frac{S_e}{S_0}$ ;

$k_0$  – константа скорости изъятия  $c^{-1}$ .

При такой интерпретации уравнения скорости окисления определяющей величиной является  $k_0$ , которая характеризует активность взаимодействия между микрофлорой и субстратом.

С другой стороны, максимальная скорость окисления ограничена скоростью поступления в систему кислорода:

$$\frac{dS}{d\tau} \leq -\beta_{об} \cdot (c^* - c) \cdot \frac{1}{\psi}, \quad (2)$$

$\beta_{об}$  – объемный коэффициент массопередачи (количество кислорода, переходящее в единицу объема жидкости за единицу времени);

$\psi$  – потребление кислорода на изъятие 1 кгБПК<sub>5</sub>,

$$\psi = \frac{dq}{dS}.$$

В начальный момент времени, при  $\tau = 0$ ,  $S_e = S_0$  и  $\gamma = 1$

$$\left(\frac{dS}{d\tau}\right)_0 = -\frac{\beta_{об} \cdot c^*}{\psi_0}, \text{ следовательно}$$

$$k_0 = \frac{\beta_{об} \cdot c^*}{\varphi_0 \cdot S_0}. \quad (3)$$

Таким образом, константа скорости окисления полностью определяется интенсивностью массопередачи и концентрацией субстрата  $S_0$ .

УДК 628.353

**Яромский В.Н., Головач Т.И.**

## К РАСЧЕТУ БЕЗНАПОРНЫХ ГИДРОЦИКЛОНОВ

Одним из наиболее важных направлений при исследовании работы безнапорных гидроциклонов является повышение эффективности очистки сточных вод, то есть повышение эффективности разделение суспензий в циклоне. Разделение суспензий в открытом гидроциклоне является сложным процессом, на который оказывают влияние много факторов. Так, на взвешенную частицу, движущуюся в потоке воды, которая

совершает вращательно-поступательное движение в открытом гидроциклоне, действуют следующие силы:

совершает вращательно-поступательное движение в открытом гидроциклоне, действуют следующие силы:

совершает вращательно-поступательное движение в открытом гидроциклоне, действуют следующие силы:

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. В.Н.Яромский. Безотходная система очистки сточных вод при обработке осадка молокоперерабатывающих предприятий. Материалы третьей научно-технической конференции, Гродно, 1999. - с. 91-95.
2. М.А.Евилевич, Л.Н.Брагинский. Оптимизация биохимической очистки сточных вод. Л.: Стройиздат, 1980. – 160 с.
3. В.А.Вавилин. Обобщенная модель аэробной биологической очистки. // Водные ресурсы. №4, 1982. - с. 136-146.
4. Ц.И.Роговская. Биохимический метод очистки производственных сточных вод. М.: Стройиздат, 1967. – 140 с.
5. Т.А.Святенко, И.В.Скидров. Усовершенствование технологии биологической очистки сточных вод. // Водоснабжение и санитарная техника №4, 1991. - с. 21-22.
6. С.В. Яковлев, Т.А.Карюхина. Биохимические процессы в очистке сточных вод. М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
7. В.А.Вавилин, В.Б.Васильев. Математическое моделирование процессов биологической очистки сточных вод активным илом. М.: Наука, 1979. – 233 с.
8. Л.Н.Брагинский, М.А.Евилевич, В.И.Бегачев и др. Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод. Л.: Химия, 1980. – 144 с.
9. В.Н. Яромский, М.В. Якович. Применение пульсационных биореакторов для очистки производственных и сточных вод. Материалы международной научно-практической конференции «Проблемы и перспективы развития городского водного хозяйства», г. Новополюцк, 2001.
10. В.М.Рамм. Адсорбция газов. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Химия, 1976. - 656 с.
11. Б.П.Ленский, В.Д.Климухин. Массообменные свойства биофильтров с различными нагрузками // Химия и технология воды. №6, 1992. - с.469-475.

**Головач Татьяна Ивановна.** Ассистент каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестского государственного технического университета.  
Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.

$$\text{сила сопротивления среды: } F_3 = -K * \Omega * \frac{v_q}{2 * g} * \rho_{жс}; \quad (3)$$

$$\text{сила инерции: } F = -\frac{S}{t} = -\frac{m_q * (K_y + 1) * v_q}{t}; \quad (4)$$

$$\text{подъемная сила восходящего потока: } F_5 \approx -q, \quad (5)$$

где  $m_q$  - масса частицы, кг;

$g$  - ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$R_q$  - радиус частицы, м;

$\rho_q$  - плотность частицы, кг/м<sup>3</sup>;

$v_d$  - линейная скорость вращения потока на радиусе R, м/с;

$R$  - радиус вращения частицы, м;

$K$  - коэффициент сопротивления, зависящий от значения числа Re частицы;

$\Omega$  - площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную к направлению движения, м<sup>2</sup>,  $\Omega = \frac{\pi * d_q^2}{4}$ , где  $d_q$

- диаметр частицы, м;

$v_q$  - скорость движения частицы, м/с;

$\rho_{жс}$  - плотность жидкости, кг/м<sup>3</sup>;

$S$  - импульс ударной силы, г\*с;

$t$  - время удара, с;

$K_y$  - коэффициент восстановления при ударе;

$q$  - гидравлическая нагрузка на гидроциклон, м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>\*ч).

Как видно из формул (1 - 5), данные силы зависят от следующих факторов, которые можно разделить на три группы:

1. факторы, обусловленные свойствами частиц примесей: концентрация примесей, гранулометрический состав, плотность частиц, гидравлическая крупность частиц;
2. факторы, обусловленные свойствами осветляемой жидкости: плотность, вязкость, расход сточных вод (гидравлическая нагрузка на гидроциклон);
3. факторы, формирующие гидродинамический режим аппарата: конструктивные особенности гидроциклона, размеры основных элементов и соотношения между ними.

Таким образом, эффект очистки является функцией от следующих переменных

$$\Xi = f(C_0, m_q, d_q, \rho_q, U_0, \rho_{жс}, \mu_{жс}, q, D, d_{ax}, n). \quad (6)$$

где  $C_0$  - исходная концентрация взвешенных веществ, мг/л;

$U_0$  - гидравлическая крупность частиц, мм/с;

$\mu_{жс}$  - вязкость жидкости, Н\*с/м<sup>2</sup>;

$D$  - диаметр аппарата и связанные с ним все конструктивные размеры, м;

$d_{ax}$  - диаметр впускного патрубка, м;

$n$  - количество впускных патрубков.

Рядом авторов [1-4] проводились исследования, целью которых являлось выявление каждого из этих факторов на эффект очистки сточных вод в открытых гидроциклонах различных конструкций. На основании этих исследований можно сделать следующие выводы:

- центробежные и гравитационные силы оказывают равное влияние на частицу, движущуюся в потоке в открытом гидроциклоне;
- с повышением концентрации взвешенных веществ в исходной воде содержание их в осветленной воде увеличивается, несмотря на увеличение эффекта очистки;

- с увеличением гидравлической нагрузки эффективность очистки сточных вод в открытых гидроциклонах снижается;
- при меньших гидравлических нагрузках в открытых гидроциклонах задерживаются частицы с меньшей гидравлической крупностью;
- наибольшая эффективность в гидроциклоне простейшей конструкции достигается при двух впусках;
- интенсивность вращения воды в гидроциклоне зависит от скорости потока на входе, которая обратно пропорциональна сечению впускного патрубка.

Все выше приведенные факторы необходимо комплексно учитывать при расчете открытых гидроциклонов, выборе конструкции аппарата, его технологических параметров и размеров, а также при оптимизации процесса разделения в гидроциклоне.

В зависимости от назначения гидроциклонов при их расчете используют различные показатели. В определенных случаях, например, при обогащении полезных ископаемых, этим показателем может являться граничная крупность частиц - это эквивалентный диаметр частиц, которые при заданных режимах работы должны выделиться в шлам наполовину своего содержания (50 %) или полностью (100 %). Для очистки сточных вод от взвешенных веществ расчет по граничной крупности частиц вести в большинстве случаев неприемлемо. При расчете сооружений механической очистки сточных вод действующие нормативы [5, 6] рекомендуют задаваться либо определенной остаточной концентрацией взвешенных веществ, либо определенной гидравлической крупностью задерживаемых частиц. В современных методах расчетов отстойников, которые являются наиболее часто используемыми сооружениями механической очистки сточных вод, основным показателем, характеризующим седиментационные свойства примесей жидкости, является гидравлическая крупность. Таким образом, при расчете открытых гидроциклонов, которые занимают промежуточное положение между отстойниками и напорными гидроциклонами, удобнее использовать гидравлическую крупность частиц.

В настоящее время в литературе [1, 2, 4] имеется ряд формул, которые рекомендуются использовать для расчета открытых гидроциклонов. Однако эти расчетные зависимости носят эмпирический характер, так как были получены путем обработки данных исследований конкретных видов сточных вод и конкретных конструкций гидроциклонов. Данные зависимости не претендуют на универсальность и могут применяться лишь для тех конкретных условий, в которых они были получены. Большинство из этих расчетных зависимостей были получены при исследовании очистки сточных вод, в которых главным загрязнителем были частицы минерального происхождения, которые тяжелее воды и имеют гидравлическую крупность 0,2 мм/с и выше.

Проводимые исследования по эффективности очистки сточных вод молочных производств на открытых гидроциклонах показывают, что очистка этих видов сточных вод на данных аппаратах, дает удовлетворительный эффект очистки [7]. Однако в связи с тем, что сточные воды молочных предприятий загрязнены преимущественно нерастворенными мелкодисперсными примесями органического происхождения, плотность которых практически равна плотности воды, а гидравлическая крупность менее 0,2 мм/с, возникают трудности с расчетом и подбором открытых гидроциклонов. Таким образом, возникает необходимость в разработке новой или усовершенствовании существующих расчетных зависимостей, которые бы позволили рассчитывать открытые гидроциклоны для очистки сточных вод молочных производств и учитывали бы большинство факторов, влияющих на эффект очистки.

За базовую предлагается использовать зависимость для расчета открытых гидроциклонов, предложенную и разработанную ВНИИ ВОДГЕО [8]:

$$q = 3,6 \cdot k \cdot U_0, \quad (7)$$

где  $q$  – удельная гидравлическая нагрузка,  $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ ;

$U_0$  – гидравлическая крупность задерживаемых частиц,  $\text{мм/с}$ ;

$k$  – коэффициент пропорциональности.

Данная формула предлагается для расчета конструкций открытых гидроциклонов, разработанных ВНИИ ВОДГЕО: гидроциклона простейшей конструкции, гидроциклона с конической диафрагмой, с внутренним цилиндром и конической диафрагмой и многоярусный гидроциклон.

Данная расчетная зависимость удачно выведена по отношению к гидравлической нагрузке, задаваемой величиной является гидравлическая крупность частиц. В зависимости от конструкции применяемого аппарата гидравлическая крупность задерживаемых в них частиц может изменяться от 0,2 – 0,3  $\text{мм/с}$  до 5 и более  $\text{мм/с}$ . Коэффициент пропорциональности в данной формуле принимается в зависимости от конструкции аппарата. Численные значения коэффициентов были получены путем математической обработки результатов экспериментальных исследований и промышленных испытаний гидроциклонов вышеназванных конструкций.

Таким образом, из всего многообразия факторов, влияющих на процесс разделения суспензий в гидроциклоне, в данной расчетной зависимости учитываются только некоторые из них: свойства частиц примесей, конструкция аппарата и его основные размеры. При этом, как уже упоминалось выше, действительна она только для четырех конструкций гидроциклонов. В связи с этим предлагается в данную формулу ввести ряд коэффициентов, которые позволят учитывать больше факторов, влияющих на процесс разделения суспензий. Так, в данной расчетной зависимости никак не отражено влияние вращательного движения на эффективность разделения суспензий, то есть необходимо ввести коэффициент ( $k_1$ ), учитывающий скорость вращения потока и ее снижение в результате потерь на трение и продвижения потока снизу вверх. Также в данной расчетной зависимости следует учитывать происхождение частиц взвеси и делать поправку ( $k_2$ ) на

взвесь с низкой гидравлической крупностью. Таким образом, расчетная зависимость будет иметь следующий вид:

$$q = 3,6 \cdot k \cdot U_0 \cdot k_1 \cdot k_2. \quad (8)$$

Численные значения коэффициентов  $k_1$  и  $k_2$  предлагается получить при проведении лабораторных и полупроизводственных испытаний работы открытого гидроциклона диаметром 500 мм при очистке сточных вод молочных производств.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Пантелют Г. С. Исследование и разработка компактных установок оборотного водоснабжения газоочисток сталеплавильных производств. Автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. – Харьков, 1971 (Харьковский инженерно-строительный ин-т).
2. Субботкин Л. Д. Осветление сточных вод плавильных цехов заводов цветной металлургии в вихревых декантаторах. Автореф. дис. на соиск. учен. степени. – Свердловск, 1972 (УПИ им. С. М. Кирова).
3. Скирдов И. В., Пономарев В. Г. Уточненные параметры взвеси для проектирования сооружений по очистке сточных вод прокатных цехов. – В кн.: Информационный выпуск по обмену опытом в строительном проектировании. Серия 2. – М.: Госстрой СССР, 1956, № 34.
4. И. В. Скирдов, В. Г. Пономарев. Очистка сточных вод в гидроциклонах. – М.: Стройиздат, 1975. – 176 с.
5. СНиП 2.04.03 – 85. Канализация. Наружные сети и сооружения. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 72 с.
6. С. В. Яковлев, В.И. Калищун. Механическая очистка сточных вод. – М.: Из-во лит-ры по стр-ву, 1972. – 200 с.
7. Яромский В. Н., Головач Т. И. Выбор методов и сооружений механической очистки сточных вод предприятий молочной промышленности. – “Вестник БГТУ – Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология”, № 2, 2001.
8. Канализация населенных мест и промышленных предприятий. / Н.И.Лихачев, И.И. Ларин, С.А. Хаскин и др.; Под ред. В.Н. Самохина. – М.: Стройиздат, 1981. – 639 с. – (Справочник проектировщика).

УДК 66.069.83 (088.8)

**Уласевич В.П., Новиков В.М., Костюк О.В.**

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЛУЧИСТОГО ТЕПЛООБМЕНА МЕЖДУ РАСКАЛЕННОЙ КОЛЬЦЕВОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И КУПОЛООБРАЗНОЙ ЖИДКОСТНОЙ ЗАВЕСОЙ

Исследования последних лет указывают на широкую возможность использования куполообразных жидкостных завес для создания искусственного микроклимата, а также для защиты людей, работающих вблизи энергетического оборудования, от инфракрасного излучения [1].

На рисунке 1 приведена расчетная схема установления закономерностей лучистого теплообмена между раскаленной кольцевой поверхностью и куполообразной жидкостной завесой с показом характерных элементов струйного комплекса.

Струйный комплекс формирует куполообразную жидкостную завесу следующим образом. Вода, из системы оборотного водоснабжения, под напором 0,3-0,4 МПа подается к стояку 1, на котором установлен струйный аппарат, состоящий из нижнего 2 и верхнего 3 отбойников. Отбойники при своем сопряжении образуют кольцевой канал 4, где формируется куполообразная жидкостная завеса 5, которая окружена раскаленной поверхностью 6. Куполообразная жидкостная завеса, при своем изливании, сопрягаясь с поверхностью воды в

*Уласевич Вячеслав Прокофьевич. К.т.н., профессор каф. строительных конструкций Брестского государственного технического университета.*

*Новиков Владимир Макарович. К.т.н., доцент каф. водоснабжения, водоотведения, теплоснабжения Брестского государственного технического университета.*

*Костюк Ольга Васильевна. Инженер НИС Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.*