

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО И МЕХАНИЧЕСКОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ЗАГРУЗКИ В УСТРОЙСТВАХ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Григорьева А.Н.  
генеральный  
директор

Абиев Р.Ш.  
д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой

1 – АО «Астерион»;  
2 – ОХБА СПбГТИ (ТУ)

Фильтры с биологической загрузкой из плавающих в воде гранул получили в последнее время широкое распространение из-за высокой эффективности очистки воды. Цель настоящей работы – сравнение механического и пневматического перемешивания в биологических фильтрах с плавающей загрузкой. Путем теоретического анализа было показано, что вертикальные мешалки разработанной нами формы оптимально подходят для перемешивания гранул биологической загрузки, так как значительная длина лопаток, вращаясь на небольшой скорости, создаёт крупномасштабные вихри, вовлекая частицы в поток. С другой стороны, несмотря на большие размеры лопаток конической мешалки, их изогнутая форма способствует и более полной передаче момента импульса вращающейся жидкости, и снижению потреблению энергии, поскольку форма лопаток приближается к форме линий тока жидкости. Кроме того, особая форма лопаток мешалки (близкая к форме лопаток центробежных насосов) способствует увеличению насосного эффекта, что приводит к эффективному перемешиванию плавающей загрузки.

**Ключевые слова:** мешалка, перемешивание загрузки, биологические фильтры, пневматическое перемешивание, барботаж.

Фильтры с биологической загрузкой из плавающих в воде гранул получили в последнее время широкое распространение из-за высокой эффективности очистки воды (по взвешенным веществам до 90%, по нефтепродуктам до 70%) с простой регенерацией фильтрующего материала путем обратной промывки фильтратом [1]. Проходя через загрузку биофильтра, загрязненная вода оставляет в ней нерастворенные примеси, не осевшие на этапе механической очистки, а также коллоидные и органические вещества, сорбируемые биопленкой. Часть органики микроорганизмы используют для увеличения своей биомассы, поэтому масса активной биопленки непрерывно увеличивается.

Стандартный биофильтр с плавающей загрузкой состоит из следующих частей [2]:

- фильтрующей загрузки, помещенной в резервуар круглой или прямоугольной формы;

- водораспределительного устройства для равномерного орошения сточной водой поверхности загрузки;
- дренажного устройства для удаления очищенной воды;
- воздухораспределительного устройства для подачи воздуха в биофильтр.

Биофильтры с плоскостной загрузкой компактны, имеют малую энергоемкость, надежны в эксплуатации. Кроме того, для них характерна высокая технологичность при строительстве, поскольку предусмотрено заводское изготовление всего комплекса сооружений небольшой мощности [2]. Согласно [3], наиболее эффективными являются биофильтры с псевдооживленным слоем плавающей биозагрузки. Оказавшись взвешенной в воде, загрузка приобретает большую

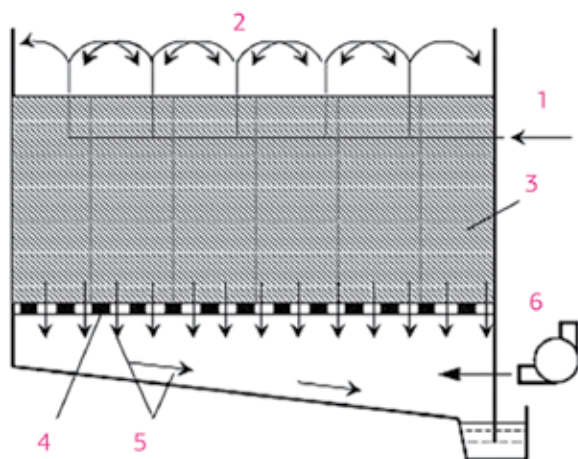


Рисунок 1

Принцип работы биофильтра.

1 – подача сточных вод; 2 – водораспределительное устройство; 3 – фильтрующая загрузка; 4 – дренажное и воздухоподводящее устройство; 5 – очищенная вода; 6 – воздуходувка.

растительную поверхность, на которой могут развиваться и функционировать биологические популяции. Поверхность загрузки со временем покрывается плотно прикрепленной активной биомассой, которая поглощает загрязнения, содержащиеся в воде. По сравнению с традиционным аэротенком со смесью активного ила, время пребывания воды в биофильтре может быть сокращено до минут, и объем резервуара уменьшен на 90%.

Эффективность очистки воды в биологических фильтрах зависит от многих факторов [4]:

- размеров отделяемых частиц и их физических свойств;
- высоты слоя и размеров гранул плавающей загрузки;
- скорости фильтрации.

Исследованию эффективности очистки при использовании гранул различных форм и размеров посвящено множество статей, целью же настоящей работы является сравнение механического и пневматического перемешивания в устройствах для очистки сточных вод. Известно, что скорость движения загрузки линейно связана со скоростью фильтрации [5]. Автор книги [3] как одно из обобщенных технических решений повышения энергоэффективности канализационных очистных сооружений отмечает использование механического перемешивания там, где это

возможно, т.к. на механическое перемешивание требуется меньше энергии, чем на перемешивание с помощью сжатого воздуха. Отмечается однако, что обустройство систем перемешивания при помощи мешалок требует изначально больших капитальных затрат, а пневматическая система, состоящая из перфорированных полипропиленовых труб, является достаточно простым и дешевым решением при обустройстве системы барботажки. Оптимальное соотношение затрат на очистку воды к качеству ее очистки, снижение энергоемкости очистных сооружений является необходимым условием сохранения конкурентоспособности предприятий. Таким образом, сравнительный анализ затрат на пневматическое и механическое перемешивание на основе методики оценки жизненного цикла с учетом факторов не только закупочной стоимости, но и эксплуатационных затрат, затрат на электроэнергию является весьма актуальной задачей. Целью настоящего исследования является проведение технико-экономической оценки указанных методов перемешивания на основе теоретического расчета потребляемой мощности, экспериментальная проверка полученных результатов.

## 1. Барботажное перемешивание (перемешивание сжатым воздухом)

Рассмотрим принцип возникновения движения жидкости при пневматическом (барботажном) перемешивании, где оно возникает как следствие ввода энергии с потоком воздуха. При этом, поскольку плотность воздуха мала, и при обычной скорости ее кинетическая энергия невелика, основным источником ввода энергии будет потенциальная энергия сжатия, обусловленная необходимостью ввода воздуха под слой жидкости.

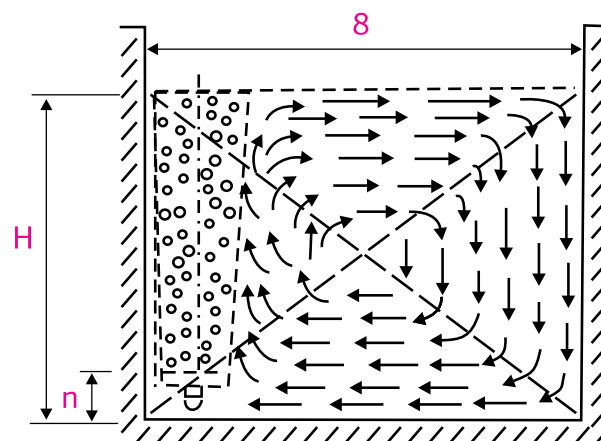


Рисунок 2

Схема потоков при барботажном перемешивании.



Движение ядра струи обусловлено разностью плотностей жидкости и газожидкостной смеси – так называемый газлифтный эффект. То есть, для создания определенной скорости потока жидкости необходимо ввести газ с определенной скоростью. На рисунке 2 показана схема потоков в поперечном сечении с барботажным перемешиванием. Физической причиной обмена энергией между газом и жидкостью является вязкое трение поверхности контакта газа и жидкой фазы. В книге [6] на основании равенства моментов циркуляционной силы и силы гидравлического сопротивления потоков о стенки азротенков выведена зависимость скорости восходящего потока в зоне азрации с геометрическими размерами азротенка и удельным расходом воздуха:

$$(w_{вс} + v_0)v_0^2 = 2,5 \frac{gV_r}{L} \cdot \frac{HB}{H^2 + B^2} \quad (1)$$

где  $w_{вс}$  – скорость всплытия пузырьков воздуха, м/с;

$v_0$  – скорость восходящего потока, м/с;

$V_r$  – расход газа, м<sup>3</sup>/с;

$L$  – длина коридора, м;

$B$  – ширина коридора, м;

$H$  – высота уровня жидкости, м.

Применительно к емкостям с двусторонним размещением воздухораспределителей или их укладкой по оси коридора величина  $B$  в уравнении (1) должна приниматься половине ширины коридора, а расход газа – половине общего расхода на коридор [6].

При барботажном перемешивании воды образуются пузырьки разных диаметров, распределение которых близко к нормальному или логнормальному, поэтому для точного расчета пневматической системы перемешивания необходимо иметь данные по скорости всплытия пузырьков в таких полидисперсных системах [7]. Однако для приближенного расчета можно принять  $w_{вс} = 0,34$  м/с, которая была рассчитана авторами [6].

Применительно к работе биологического фильтра оптимальная скорость циркуляционного потока жидкости  $v_0$  зависит от формы и размеров гранул биологической загрузки, и должна быть

регламентирована требованиями конкретной технологии. Таким образом, зная величину  $w_{вс}$  и  $v_0$ , можно рассчитать необходимый расход воздуха, используя уравнение (1).

Для циркуляционного расхода  $q_u$  можно воспользоваться формулой:

$$q_u = \frac{1}{3} v_0 L \sqrt{B^2 + H^2} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) позволяют оценить характеристики потока в азротенках с продольным перемешиванием. При расчете пневматической системы перемешивания также следует определить напор подаваемого газа  $P$  с помощью формулы Бернулли [8]:

$$P = \rho_{жс} gH + \frac{\rho_r w^2}{2} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + \sum \xi_{м.с.} \right) + P_0, \quad (3)$$

где  $\rho_{жс}$  и  $\rho_r$  – плотность жидкости и газа, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – глубина погружения азраторов;

$w$  – скорость газа в трубе, м/с;

$l$  и  $d$  – длина и внутренний диаметр трубы, м;

$\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления трубы;

$\sum \xi_{м.с.}$  – сумма коэффициентов местных сопротивлений;

$P_0$  – давление на поверхность жидкости в аппарате, Па.

Слагаемые  $P_0$  и  $\rho_{жс} gH$  в сумме составляют гидростатическое давление столба жидкости на глубине погружения барботеров.

Произведение  $\frac{\rho_r w^2}{2} \left( 1 + \frac{\lambda l}{d} + \sum \xi_{м.с.} \right)$  включает в себя сумму динамического давления потока воздуха в трубе азратора, потери по длине трубы, а также потери на преодоление местных сопротивлений (повороты, выходы/входы и т.д.).

Потери давления по длине трубы рассчитываются по формуле Дарси-Вейебаха:

$$\Delta p_{mp} = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho_r w^2}{2}. \quad (4)$$

Коэффициент гидравлического трения  $\lambda$  для развитого турбулентного течения газа/жидкости в трубах рассчитывается по формуле:

$$\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg(\text{Re}) - 1,64)^2}, \quad (5)$$

где  $\text{Re} = \frac{\rho_r d w}{\mu}$  – критерий Рейнольдса;

$\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па·с.

Потери давления на преодоление местных сопротивлений рассчитываются по формуле:

$$\Delta p_{\text{мест}} = \xi \frac{\rho_r w^2}{2}, \quad (6)$$

где  $\xi$  – коэффициент местного сопротивления, значения которых указаны в [8].

Мощность, затрачиваемая на пневматическое перемешивание,  $N_{\text{мш}}$  рассчитывается по формуле:

$$N_{\text{мш}} = \frac{V_r P}{\eta}, \quad (7)$$

где  $\eta$  – КПД воздухоподувки.

## 2. Механическое перемешивание

Перемешивание загрузки можно отнести к процессу создания гетерогенных систем (суспендирование твердого вещества в жидкости). Известно, что переход твердого вещества во взвешенное состояние в основном зависит от величины аксиальной составляющей вектора скорости потока, создаваемого мешалкой. Следовательно, процесс диспергирования возможен только в случае, когда аксиальная составляющая

скорости потока жидкости больше или равна скорости осаждения твердой фазы. Плавающая биологическая загрузка характеризуется тем, что гранулы имеют плотность ниже, чем жидкость (от 920 кг/м<sup>3</sup> до 980 кг/м<sup>3</sup>), по мере обрастания их масса увеличивается, и плотность гранулы приближается к плотности воды.

Основой для разработки методики расчёта конструктивных параметров механических перемешивающих устройств является теория перемешивания в жидких средах, разработанная сотрудниками ЛенНИИХИММАШ. Наиболее полно эта теория приведена в работе [9], где изложены представления о физическом механизме перемешивания жидких сред, методика инженерного расчёта гидродинамики перемешивания, тепло- и массообмена, турбулентной диффузии и другие. На основе [9] создан руководящий нормативный документ [10], который регламентирует метод расчёта механических перемешивающих устройств промышленных аппаратов. В [10] изложены рекомендации по выбору конструкции перемешивающего устройства, методика расчёта мощности, затрачиваемой на перемешивание при турбулентном и ламинарном режимах. Следует отметить, что большинство процессов перемешивания в водоочистке проводится в турбулентном режиме. Методика подбора перемешивающих устройств сводится к определению требуемой частоты вращения и диаметра мешалки. Наибольшее распространение в настоящий момент в России получили погружные мешалки, создающие горизонтальный поток. Методика их подбора подробно изложена в [11].

При движении гранулы в потоке жидкости, создаваемом мешалкой, следует избегать создания мелкомасштабных вихрей. Масштаб



(a)

(б)

Рисунок 4

Внешний вид (а) гранул биологической загрузки; (б) гранул, которые обросли биомассой на поверхности (главным образом внутренней).



турбулентности (масштаб пульсаций), в котором и происходит основная диссипация энергии, получил название микромасштаба Колмогорова.

$$\eta_k = \left( \frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} = \left( \frac{v^3 m}{K_N \rho_{жс} n^3 d_M^5} \right)^{1/4} \quad (8)$$

Где,  $\eta_k$  – удельная скорость диссипации энергии, Вт/кг;

$v$  – вязкость жидкости;

$m$  – масса жидкости, м<sup>3</sup>;

$K_N$  – коэффициент мощности мешалки;

$\rho_{жс}$  – плотность жидкости;

$d_M$  – диаметр мешалки, м;

$n$  – частота вращения мешалки, об/с.

Из анализа формулы (8) можно сделать вывод, что для перемешивания загрузки быстроходные мешалки не подходят, т.к. подобного рода перемешивающие устройства создают мелкомасштабные пульсации, которые работают на разрыв гранулы загрузки, не приводя ее в движение должным образом. Наиболее эффективные мешалки для рассматриваемой задачи – низкооборотные, с низким коэффициентом мощности, т.е. лопасти мешалки должны иметь низкое гидравлическое сопротивление. Именно поэтому в настоящей статье мы остановимся на выборе и определении параметров вертикальных мешалок запатентованной нами геометрической формы [12], диаметр которых достигает 3 метров, и создает крупномасштабные пульсации, попадая под действие которых гранулы загрузки увлекаются в поток и начинают перемешиваться.

При первоначальной загрузке гранулы имеют плотность ниже, чем жидкость, что приводит к плаванию на поверхности. На частицу, всплывающую в поле сил тяжести, действуют 3 силы: тяжести  $F_T$ , Архимеда  $F_a$  и трения  $F_{mp}$ . Примем, что частица находится в равновесии, тогда согласно 2 закону Ньютона получим:

$$F_T + F_a + F_{mp} = 0 \quad (9)$$

Путем несложных математических преобразований из уравнения (9) можно найти скорость всплытия частицы  $V_{вс}$ :

$$V_{вс} = \left[ \frac{4 g d_q (\rho_{жс} - \rho_q)}{3 C \rho_{жс}} \right]^{1/2}, \quad (10)$$

где  $d_q$  – диаметр частицы (гранулы биоагрузки), м

$C$  – коэффициент гидравлического сопротивления частицы, зависящий от режима всплытия и формы гранул.

Для того, чтобы привести в движение всплывающие частицы мешалка должна обладать достаточной насосной производительностью, чтобы создать нисходящий поток и увлечь твердые частицы на дно. Следовательно, насосный эффект  $V_p$  должен быть выше силы всплытия частицы. В книге [13] выведено уравнение для расчета насосного эффекта  $V_p$ :

$$V_{pm} = \frac{\pi}{4} (1-k) n d^3 \frac{S}{d_m} \left[ 1 - \frac{S^2}{\pi^2 d_m^2} \ln \left( 1 + \frac{\pi^2 d_m^2}{S^2} \right) \right] \quad (10)$$

где  $k$  – коэффициент, который определяется экспериментальным путем и зависит от угла наклона лопасти;

$S$  – шаг мешалки, м.

Приравнивая правые части уравнений (11) и (10), можно найти необходимую частоту вращения мешалки при определенном диаметре.

В процессе обрастания гранул биомассой задачи перемешивания изменяются, по мере роста массы гранулы частицы начинают оседать на дно и необходимая скорость вращения мешалки определяется по методологии, разработанной Цвитерингом [14]. В иностранной литературе скорость вращения мешалки, необходимая для подъема осадка со дна, обозначается как «just suspend speed»  $N_{js}$ . Многочисленные исследования на эту тему провел Цвитеринг [14], который предложил формулу для расчета минимально достаточной частоты вращения:

$$N_{js} = S v^{0,1} d^{0,2} \left( g \frac{\rho_q - \rho_{жс}}{\rho_{жс}} \right)^{0,45} d_M^{-0,85} B^{0,13} \quad (12)$$

где  $S$  – критерий Цвитеринга, определяемый опытным путем и зависящий от геометрии мешалки и соотношения размеров перемешивающего устройства и емкости;



$\nu$  – кинематическая вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с;

$B$  – концентрация твердых включений, %.

Мощность, расходуемая на перемешивание жидкости одной мешалкой по формуле:

$$N_{\text{меш}} = K_N \rho n^3 d_m^5 \quad (13)$$

Суммарная потребляемая мощность всех механических перемешивающих устройств находится по формуле:

$$N_{\text{мех}} = \frac{x \times N_{\text{меш}}}{\eta_{\text{MT}}}, \quad (14)$$

где  $x$  – число перемешивающих устройств в резервуаре;

$\eta_{\text{MT}}$  – КПД мотор-редуктора.

### Пример сравнительного расчета пневматического и механического перемешивания

Экспериментальная оценка перемешивания биологической загрузки была проведена на предприятии ООО «Акваферма», расположенном в пос. Тяглино Ленинградской области. В состав устройства замкнутого водоснабжения входит биофильтр, который очищает воду от продуктов жизнедеятельности рыб. Для проведения эксперимента в биофильтр были смонтированы параллельно 2 системы перемешивания: пневматическая и механическая мешалка. Внешний вид биофильтра представлен на рисунке 5, схема установки – на рисунке 6.

При помощи анализатора кислорода были проведены замеры концентрации растворенного кислорода. Анализ поступающей в биофильтр воды, подлежащей очистке показал, что содержание кислорода в ней достаточно для проведения

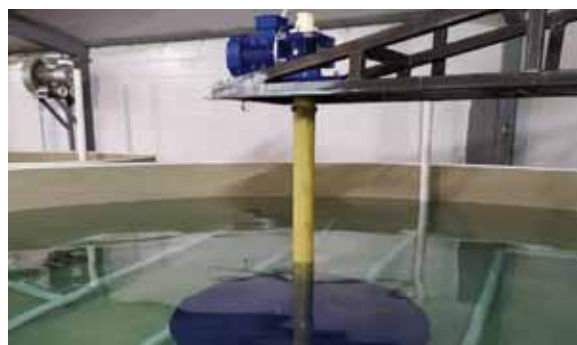


Рисунок 5  
Внешний вид биофильтра с установленной мешалкой и аэрационными трубами.

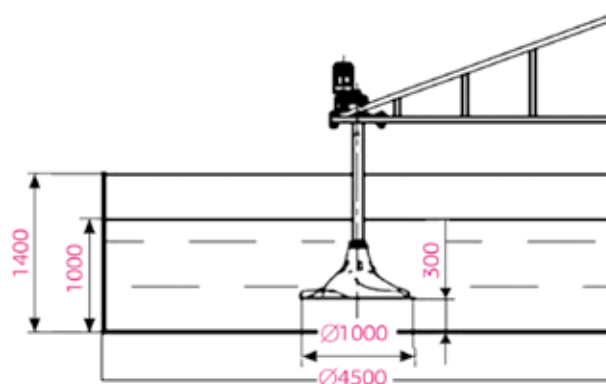


Рисунок 6  
Схема аппарата для проведения эксперимента.

процесса нитрификации бактерий, наибольшая часть воздуха в биофильтр подается для перемешивания биологической загрузки. Данное обстоятельство типично для рыбоводческих хозяйств, так как чистый кислород вводится в воду при помощи специальных оксигенаторов, и жизненно необходим для нормального существования рыб.

В начале эксперимента были произведены замеры основных рабочих параметров в биофильтре с пневматическим перемешиванием, которые были приняты на предприятии (табл. 1).

Основные параметры существующего биофильтра

Таблица 1

Наименование	Значение
Рабочий объем биофильтра, м <sup>3</sup>	20
Расход воздуха на перемешивание, м <sup>3</sup> /час	125
Температура воды, °С	20±0,5
Концентрация растворенного кислорода в жидкости, приходящей в биофильтр, мг/л	10,5
Доля от полного насыщения, %	115÷120

**Пневматическая система перемешивания**

Необходимая скорость потока жидкости, м/с	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Напор, Мпа	Потребляемая мощность воздуходувки, кВт	Установленная мощность двигателя с учетом КПД, кВт
0,3	205	0,107	6,05	8

**Механическая система перемешивания**

Необходимая скорость в периферийной зоне [15]	Диаметр мешалки, м	Частота вращения, об./мин	Потребляемая мощность мешалки, кВт	Установленная мощность мотор-редуктора с учетом КПД, кВт
0,3 м/с	1	75	0,5	0,75

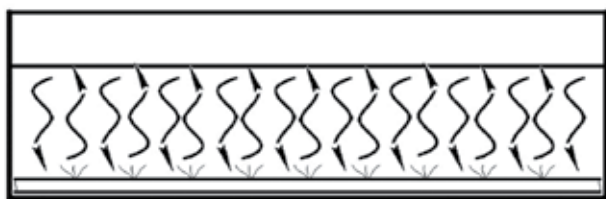
В ходе проведения теоретических расчетов были определены необходимые условия.

После проведения теоретического расчета воздуха было установлено, что перемешивание при помощи воздуходувки 4 кВт обеспечивает неполное поднятие гранул биоагрузки со дна. Порой потребители оценивают достаточность подачи воздуха только на основании визуального осмотра, однако движение некоторых гранул на поверхности жидкости вовсе не означает, что мощность компрессора достаточна для создания скорости потока, способной полностью увлечь все гранулы в поток. Минимально необходимая частота вращения мешалки также была подтверждена экспериментально. Путем частотного регулирования двигателя при снижении скорости вращения ниже 75 об./мин наблюдалось образование застойных зон по периметру емкости. Кроме того, на акваферме, как временный вариант, на дне установлены трубы для пневматической системы, они

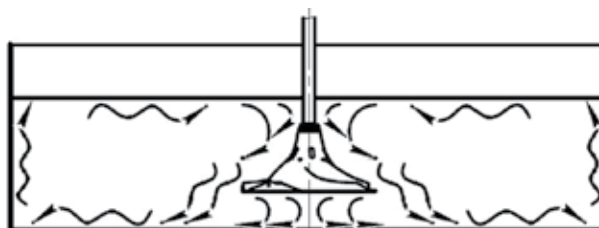
создают достаточно серьезное гидравлическое сопротивление и требуют увеличения мощности и частоты вращения мешалки, следовательно установленная мощность для работы составила 1,1 кВт вместо рассчитанного теоретического значения.

В ходе проведения экспериментального исследования также было замечено, что при пневматической системе перемешивания циркуляция биоагрузки происходит преимущественно в вертикальном направлении и на поверхности жидкости. Вследствие этого обновление межфазной поверхности массообмена происходит не столь интенсивно, как могло бы быть. Из-за этого падает эффективность очистки, и увеличивается время пребывания очищаемой воды в биофилтре.

В случае с механической системой перемешивания при использовании мешалки образуется циркуляционный контур намного большей длины, благодаря которому биоагрузка способна



**Рисунок 7**  
Схема потоков жидкости в пневматической системе перемешивания.



**Рисунок 8**  
Схема потоков жидкости при механическом перемешивании мешалкой GMS.

циркулировать по всему объему жидкости (рис. 8). Это способствует более интенсивному массообмену и уменьшению времени пребывания воды в биофильтре. При таком движении гранул скорость фильтрации намного больше.

## Экономическое сравнение двух систем перемешивания

Сравнительный анализ затрат на эксплуатацию проводился на основании стоимости жизненного цикла. Методика проведения анализа стоимости жизненного цикла (LCC) проведена по аналогии с насосным оборудованием, и подробно изложена в [16].

$$LCC = C_{ic} + C_{in} + C_e + C_o + C_m + C_s + C_{env} + C_d,$$

где  $C_{ic}$  – начальная стоимость, стоимость приобретения;

$C_{in}$  – стоимость монтажа и пусконаладочных работ;

$C_e$  – стоимость электроэнергии в течение установленного срока службы;

$C_o$  – эксплуатационные затраты (затраты на обслуживающий персонал при штатной работе оборудования);

$C_m$  – стоимость обслуживания и ремонта (расходы на запчасти и человеко-часы);

$C_s$  – стоимость потерь от простоя оборудования;

$C_{env}$  – стоимость природоохранных мероприятий (загрязнение от перекачиваемой среды и вспомогательного оборудования);

$C_d$  – стоимость работ по демонтажу и утилизации оборудования.

### Экономическое сравнение систем перемешивания

Таблица 3

№ пп	Наименование	Стоимость, руб. с НДС		Отношение (2) к (1)
		Пневматическая система (1)	Механическое перемешивание (2)	
1.	$C_{ic}$ стоимость приобретения, в т.ч.	85 000	90 000	1,05
	Закупочная стоимость мешалки		90 000	
	Закупочная стоимость воздухоудвки	70 000		
	Стоимость труб и фитингов для распределительной системы воздуха	15000		
2.	$C_{in}$ стоимость монтажа и пусконаладочных работ (ПНР), в т.ч.	8000	16000	2
	Комплект креплений мешалки	0	15000	
	Монтаж мешалки (1 час)	0	1000	
	Перфорация труб и монтаж системы распределения воздуха (5 час.)	5000	0	
	Монтаж системы разводки труб (3 часа)	3000		
3.	$C_e$ стоимость потребляемой электроэнергии (Стоимость энергии 4,79 руб. за кВт/ч, работа 24 часа в сутки, 10 лет)	$4 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 10 \cdot 4,79 = 1678416$	$1,1 \cdot 24 \cdot 365 \cdot 10 \cdot 4,79 = 461564,4$	0,28
4.	$C_m$ стоимость обслуживания, в т.ч.	150 000	30 000	0,25
	Периодическая очистка и продувка труб	100000	0	
	Замена масла в редукторе мешалки	0	30000	
	Тех. обслуживание воздухоудвки	20000	0	
	Итого, руб.	2 134 416	733 564	0,34





## Выводы

В результате проведенной работы путем теоретического анализа было показано, что вертикальные мешалки разработанной нами формы оптимально подходят для перемешивания гранул биологической загрузки, так как значительная длина лопаток, вращаясь на небольшой скорости, создаёт крупномасштабные вихри, вовлекая частицы в поток. С другой стороны, несмотря на большие размеры лопаток конической мешалки, их изогнутая форма способствует и более полной передаче момента импульса вращающейся жидкости, и снижению потреблению энергии, поскольку форма лопаток приближается к форме линий тока жидкости. Кроме того, особая форма лопаток мешалки (близкая к форме лопаток центробежных насосов) способствует увеличению

насосного эффекта, что приводит к эффективному перемешиванию плавающей загрузки.

Для точного расчета перемешивающих устройств помимо геометрических размеров емкости важно принимать во внимание форму гранул, а также обладать информацией относительно массы твердой частицы с уже наростшей биопленкой. На примере биологического фильтра, установленного на предприятии ООО «Акваферма», рассчитана потребляемая мощность при разных системах перемешивания, показана экономическая выгода при замене пневматического перемешивания на механическое. В результате анализа жизненного цикла было найдено, что наибольшая доля затрат приходится на электроэнергию, потребляемую на протяжении всего цикла работы. Суммарные общие затраты при использовании мешалки ниже практически в три раза.

## Литература:

1. Яковлев С.В. и др. Очистка производственных сточных вод, М.: Стройиздат, 2005.
2. Гудков А.Г., Биологическая очистка сточных вод: Учебное пособие, Вологда: ВоГТУ, 202.
3. Корчевская Ю.В., Кадышева А.А., Горелкина Г.А., «Применение псевдооживленного слоя в биологической очистке сточных вод», Вестник Алтайского государственного аграрного университета, т. 2, № 136, pp. 67-71, 2016.
4. Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Попов И.А., Сажин В.Б., «Использование фильтров с плавающей загрузкой для промышленной очистки сточных вод.» Успехи в химии и химической технологии. Том XXIII, pp. 106-113, №8 (101) 2009.
5. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А., Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы, Л.: Химия, 1979.
6. В.И., Брагинский Л.Н. Евилевич М.А. Бегачев, Моделирование аэрационных сооружений для очистки сточных вод, Л.: Химия, 1980г.
7. Мешенгиссер Ю.М., Теоретическое обоснование и разработка новых полимерных аэраторов для биологической очистки сточных вод, Москва: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, 2005.
8. А.Г.Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии, М.: "Химия", 1971.
9. Брагинский Л.Н., Бегачев В.И., Барабаш В.М., Перемешивание в жидких средах, Л.: Химия, 1984.
10. В.М.Барабаш, В.И.Бегачев, Л.Н.Брагинский, Э.А.Васильцов, О.Е.Вишневецкая, Г.В.Горбачева, Г.Г.Егорова, Е.Г.Козлова, Л.Л.Лалакина, С.С.Максимова, В.Л.Садовский, В.Г.Ушаков, А.В.Черников, В.В.Ярошенко, РД 26-01-90-85 «Механические перемешивающие устройства. Метод расчета», 1986.
11. Мишуков Б. Г., Соловьева Е. А., Расчет и подбор аэрационного и перемешивающего оборудования для биологической очистки сточных вод: учебное пособие, Санкт-Петербург: СПб. гос. архит.-строит. ун-т, 2007.
12. Григорьева А.Н., Абиев Р.Ш., «Перемешивающее устройство». Россия Патент 2 683 078, 06 06 2018.
13. Ф.Стренк, Перемешивание и аппараты с мешалками, Л.: Химия, 1975.
14. Zwietering, T. N, «Suspending of solid particles in liquid by agitators.» Chemical Engineering Science, Т. %1 из %28(3-4), pp. 244-253, 1958.
15. Merkblatt DWA-M 229-1. Systeme zur Belueftung und Durchmischung von Belebungsanlagen- Teil 1: Planung, Ausschreibung und Ausfuering, Semtember 2017.
16. Стоимость жизненного цикла насоса (LCC): руководство по анализу LCC насосных систем., М.: ООО «Софтком», 2010.

## НОВОСТИ

### Строительство белоярского водозабора выходит на финишную прямую (Республика Хакасия)

В рамках национального проекта «Экология» в Хакасии реализуется региональный проект «Чистая вода». Повышение качества питьевой воды из систем централизованного водоснабжения – главная цель этого проекта. На его реализацию в течение 5 лет выделено свыше миллиарда рублей, причем 99% финансирования – за счет федерального бюджета.

С 2019 г. в Белом Яре строится водозабор – первый объект, который входит в проект «Чистая вода», его стоимость составляет более 70 млн. руб.

В настоящий момент возведение объекта близится к завершению – подрядная организация занимается благоустройством прилегающей территории: устанавливает ограждения и вертикальную планировку, выравнивает площадки песчано-гравийной подсыпкой.

Далее планируется подготовка водозабора к эксплуатации – промывка оборудования и обеззараживание построенной системы водоснабжения.

Источник: по материалам Администрации Республики Хакасия.