

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В.Ломоносова»

Кафедра биотехнологии

Е.Д. Гельфанд
доктор технических наук, профессор

Основы биологической очистки сточных вод

Лекция для студентов, обучающихся по специальностям
240700.62, 240100.62, 280200.62, 240406.01, 200402.01.

г. Архангельск

2012

1. Как осуществляется процесс

Представим себе открытую емкость в форме длинного коридора, в которую с одной стороны непрерывно подают сточную воду и биомассу микроорганизмов (в виде водной суспензии). Образовавшаяся смесь непрерывно движется по коридору (специальное название – аэротенк), полностью заполняя его, и со стороны, противоположной вводу, непрерывно выводится; в процессе движения по аэротенку среда непрерывно насыщается кислородом за счёт того, что на дне аэротенка установлены специальные элементы, в которые непрерывно подают воздух; элементы снабжены отверстиями, через которые воздух проникает в движущуюся жидкость; пузырьки воздуха контактируют с ней и некоторое количество кислорода непрерывно растворяется в жидкости.

Что же происходит с веществами, содержащимися в сточной воде и обуславливающими её загрязнение, по мере прохождения воды через аэротенк? Дело в том, что эти вещества имеют в основном органическую природу и в принципе способны быть своеобразной пищей для определенных микроорганизмов, т.е. микроорганизмы их усваивают, за счет этого размножаются (общая биомасса микроорганизмов в среде, выходящей из аэротенка, больше, чем на входе в аэротенк), а концентрация загрязнений в воде понижается и при хорошей организации процесса степень исчерпывания загрязнений может быть достаточно высокой и достигать 95% и более. Подача воздуха в аэротенк необходима для того, чтобы обеспечить дыхание микроорганизмов, иначе удаление загрязнений не может быть эффективным.

Таким образом, из аэротенка выходит сточная вода, из которой изъяты загрязняющие органические вещества (т.н. биологически очищенная вода), и в этой воде находятся в виде взвесей те микроорганизмы, которые были введены в аэротенк и те, которые «выросли» в аэротенке за счёт усвоения органических веществ, загрязнявших сточную воду. Остается только отделить взвесь микроорганизмов от биологически очищенной воды и вернуть их обратно в аэротенк; для этого весь поток из аэротенка направляют в отстойник, в котором он разделяется на биологически очищенную воду и осадок; последний (представляющий собой подвижную суспензию с концентрацией взвешенных частиц 0,4-0,8% и более) возвращают в аэротенк и при этом отделяют (на дальнейшую утилизацию) некоторую часть суспензии, адекватную приросту биомассы микроорганизмов в аэротенке.

В целом рассматриваемый процесс можно иллюстрировать следующей блок-схемой (рис. 1).

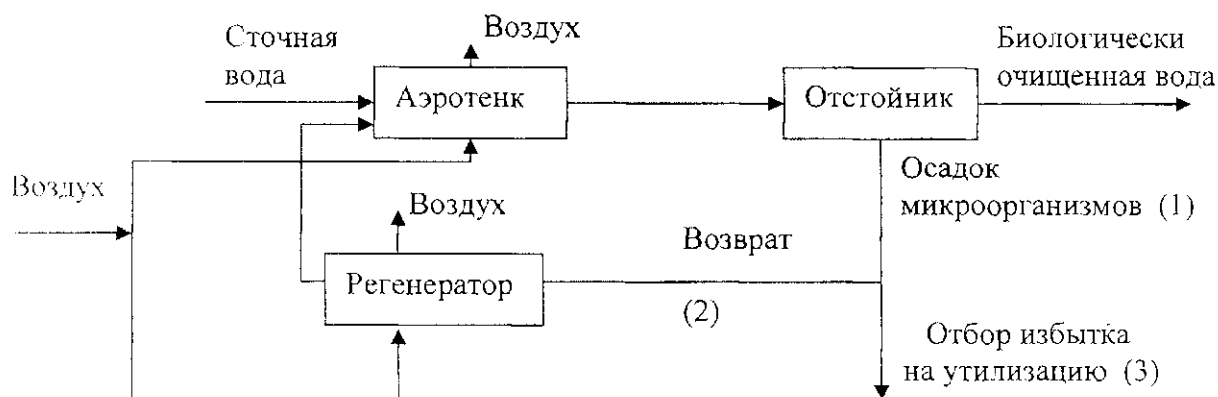


Рис. 1 – Блок – схема биологической очистки сточных вод

Примечание: общепринятые в технологии биологической очистки названия потоков: 1 – активный ил; 2 – возвратный ил; 3 – избыточный ил или биологический осадок.

Из изложенного может сложиться представление о крайней простоте технологии биологической очистки сточных вод. В действительности достижение высокого эффекта очистки и обеспечение стабильности процесса возможны только на основе осознания того, что представленная на рис. 1 блок-схема является системой, в которой тесно взаимодействуют 5 субъектов: 1) сточная вода, 2) аэротенк, 3) микроорганизмы, 4) отстойник, 5) регенератор.

2. Характеристика субъектов системы биологической очистки

2.1 Сточная вода

Любая сточная вода представляет собой раствор органических веществ, набор которых и их концентрации обусловлены происхождением воды. Для характеристики загрязненности сточных вод применяют следующие показатели: БПК₅, БПК₂₀, БПК_{полн}, ХПК.

БПК₅ – это количество кислорода в растворенном виде (в мг O₂ на 1 дм³ сточной воды), которое потребляют микроорганизмы (введённые в неё) при 5-суточной инкубации на дыхание, связанное с ассимиляцией содержащихся в воде органических загрязнений и превращением их в CO₂, H₂O и микробную биомассу.

БПК₂₀ и БПК_{полн} – то же, что и БПК₅, но при 20-суточной инкубации и при полном исчерпывании органических загрязнений.

ХПК – это количество кислорода (в мг O_2 на 1 $дм^3$ сточной воды), которое необходимо для полного окисления (химическим путём) всех содержащихся в воде органических загрязнений до CO_2 и H_2O .

По степени возрастания численных значений показатели загрязненности воды располагаются в следующий ряд: $БПК_5 < БПК_{20} < БПК_{полн} < ХПК$. При этом соотношения между численными значениями этих показателей различны для вод различного происхождения; они характеризуют специфичность воды, как объекта очистки, и меру пригодности биологического способа для очистки конкретной воды; в частности, чем больше разница между $БПК_5$ и ХПК, тем менее эффективна биологическая очистка применительно к данной воде. Идеально пригодной для биологической очистки является вода, у которой показатель $БПК_5$ максимально приближен к ХПК. Разница между численными значениями $БПК_{полн}$ и ХПК показывает наличие растворенных органических веществ, которые не могут усваиваться микроорганизмами. Чем больше разница между ХПК и $БПК_{полн}$, тем выше остаточная загрязненность сточных вод, прошедших биологическую очистку. Неофициально принято считать, что применять биологическую очистку воды с показателем $БПК_{полн}$ менее 70% от ХПК в качестве единственного способа очистки нецелесообразно.

Для того, чтобы лучше понять отношение микроорганизмов к различным загрязнениям, представим их в виде куска хлеба с вареньем. Загрязнения, входящие в показатель $БПК_5$ – это варенье; загрязнения, определяемые как разница между показателями $БПК_{20}$ и $БПК_5$ – это хлеб; загрязнения, определяемые как разница между показателями $БПК_{полн}$ и $БПК_{20}$ – это подгорелая корка у хлеба; загрязнения, определяемые как разница между показателями ХПК и $БПК_{полн}$ – это косточки, попадающиеся в варенье. Если исходить из этой модели структуры загрязнений в сточных водах, то становится очевидным, что для достижения максимальной степени изъятия **всех** загрязнений желательно, чтобы варенья на куске хлеба не было слишком мало.

Поскольку при биологическом способе очистки сточная вода выступает в качестве питательной среды для микроорганизмов, то для эффективного исчерпывания загрязнений и усвоения их микроорганизмами она должна содержать в своем составе минимально необходимый набор биогенных элементов – соединения азота, фосфора и калия, причем, в концентрациях, адекватных показателю $БПК_5$.

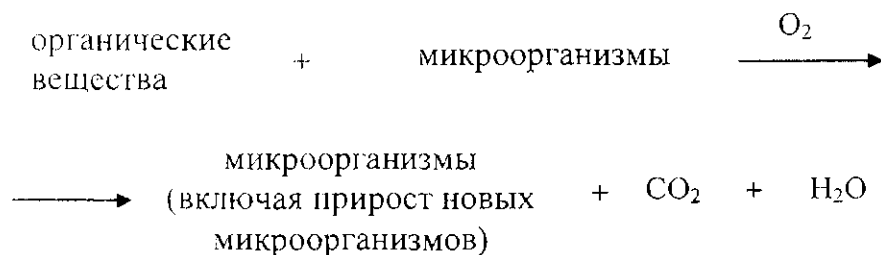
Численные значения показателя БПК_{полн} сточной воды и её расход (м³/час) должны соответствовать паспортным характеристикам аэротенка. Чаще всего показатель БПК_{полн} составляет от 100 до 200 (и более) мг О₂/дм³.

Целевыми параметрами очистки являются: а) показатели БПК и ХПК биологически очищенной воды, б) содержание взвешенных веществ.

На эффективность биологической очистки воды влияют концентрация растворенного кислорода, температура и кислотность среды, поэтому желательно поддерживать их на оптимальном уровне; особенно это касается показателя pH, который должен быть близким к 7 (пределы варьирования 6,8-8,2).

2.2 Аэротенк¹

Аэротенк – это по существу биореактор, в котором происходит истощение органических загрязнений микроорганизмами в соответствии со схемой:



В связи с тем, что процесс очистки протекает с участием кислорода и сопровождается образованием CO₂ и H₂O, в литературе по биологической очистке сточных вод его часто называют биологическим окислением органических загрязнений; на самом деле кислород непосредственно не участвует в окислении загрязнений, он используется микроорганизмами на дыхание, в результате чего они получают энергию, необходимую для биосинтеза новых микроорганизмов.

Заметим, что микроорганизмы потребляют кислород, находящийся только в растворенном состоянии. Поэтому важнейшей технической характеристикой аэротенка является то, какое количество кислорода в **растворенном состоянии** вводится в единицу объема аэротенка в единицу времени в результате непрерывной аэрации среды, протекающей через аэротенк. В общей биотехнологии этот параметр принято называть *коэффициентом сорбции кислорода* и выражать его в кг О₂/м³*час.

¹ Замечание для студентов – биотехнологов: процесс, происходящий в аэротенке, классифицируется как глубинное, аэробное, градиентно-непрерывное культивирование микроорганизмов с рециклом биомассы.

Применительно к работе аэротенков используют параметр «*окислительная мощность (ОМ)*»; он показывает, какое количество загрязнений в расчете на БПК (в мг, г или кг) может исчерпываться из сточной воды в 1 м³ рабочего объема аэротенка за 1 сутки при отсутствии каких-либо ограничений (подача сточной воды, обеспеченность микроорганизмами и пр.). По существу этот показатель представляет не что иное, как коэффициент сорбции кислорода, помноженный на 24. В реальных условиях показатель ОМ аэротенков варьирует от 600 до 1300 гО₂/м³*сутки.

Численное значение показателя ОМ является мерой конструктивного совершенства аппарата, в частности, элементов, обуславливающих интенсивность массообмена между потоком воздуха, вводимым в аэротенк, и жидкостью, находящейся в нем. Чем больше ОМ, тем большее количество загрязнений возможно изъять в данном аппарате в единицу времени. Но, с другой стороны, необходимо иметь в виду, что при прочих равных условиях движущей силой растворения кислорода является наличие в среде активно функционирующих (т.е. потребляющих одновременно и органические вещества и кислород) микроорганизмов; если концентрация их ограничена и/или активность мала, то фактически достигаемая окислительная мощность аэротенка оказывается ниже того уровня, который потенциально заложен в конструкции аэротенка. Отсюда следует вывод, что нагрузка аэротенка по БПК, а также количество поступающих микроорганизмов должны соответствовать паспортному значению окислительной мощности аэротенка. И всё же необходимо иметь в виду, что основной задачей процесса является не достижение максимальной окислительной мощности, а максимальное изъятие загрязнений из сточной воды.

Рассмотрим другие показатели, характеризующие работу аэротенка.

Интенсивность аэрации – это количество воздуха в м³, подаваемое в расчете на 1 м³ рабочего объема аэротенка за 1 час. С этим показателем связано энергопотребление на очистку воды, так как для подачи воздуха в аэротенк требуются мощные турбовоздуходувки. В наиболее широко применяемых конструкциях аэротенков интенсивность аэрации составляет от 0,8 до 8-10 м³/(м³*ч).

Время аэрации или продолжительность пребывания сточной воды в аэротенке. Она должна быть такой, чтобы микроорганизмы «успели» достаточно полно изъять из воды содержащиеся в ней загрязнения. В биотехнологии чаще оперируют другим показателем – величиной, обратной продолжительности аэрации и называемой дебит; это удельная нагрузка аэротенка по сточной воде (количество м³ сточной воды, поступающее в расчете на 1 м³ рабочего объема аэротенка за 1 час). Чем больше дебит, тем больше производительность аэротенка по сточной воде. В реальных условиях дебит устанавливают таким, чтобы

остаточная загрязненность воды (выходящей из аэротенка) не превышала заданных значений: обычно это соответствует дебиту в пределах $0,08 \dots 0,10 \text{ ч}^{-1}$.

Рабочая концентрация микроорганизмов в аэротенке. В принципе она должна находиться в соответствии с загрязненностью поступающей в аэротенк сточной воды. Установлено, что для любого уровня загрязненности воды существует оптимальная концентрация микроорганизмов в аэротенке. Если фактическая концентрация не соответствует оптимальной, то это приводит к снижению эффективности очистки и ухудшению работы отстойников (см. далее), в частности, уменьшится полнота отделения взвешенных веществ от биологически очищенной воды.

При промышленной эксплуатации аэротенков концентрацию микроорганизмов определяют косвенно — по общему содержанию взвешенных веществ (т.е. активного ила), которое в зависимости от различных факторов может варьировать от 2 до $4,5 \text{ кг/дм}^3$.*

2.3 Микроорганизмы

Микроорганизмы, «работающие» в аэротенке — это сложные (по числу и разнообразию различных видов) сообщества, формирующиеся естественным путем в процессе работы аэротенка. Основной фактор (но не единственный), влияющий на состав сообщества, — это качественный состав и количественное соотношение различных видов органических загрязнений, содержащихся в сточной воде.

Важно отметить, что в состав этих сообществ входят не только облигатные аэробы, но также факультативные анаэробы и микроаэрофилы**. Обычно в системах биологической очистки сообщества микроорганизмов образуют специфические пространственные структуры в виде хлопьев, называемых **активным илом** (осевшая масса хлопьев внешне очень схожа с легкими, подвижными отложениями на дне природных водоемов, которые обычно называют илом). Образование хлопьев в аэротенках имеет важное практическое значение, так как хлопья в отличие от одиночных микробных клеток значительно быстрее и полнее выпадают в осадок при отстаивании смеси, выходящей из аэротенка; это дает возможность отделять микроорганизмы от биологически очищенной воды с минимальными затратами — самым дешёвым способом - путем отстаивания.

* Замечание для студентов — биотехнологов: рабочая концентрация микроорганизмов в аэротенках в десятки раз превышает концентрацию естественного прироста

** Замечание для студентов — биотехнологов: это обусловлено тем, что фактическая концентрация микроорганизмов многократно превышает т.н. предельную (критическую), рассчитываемую исходя из коэффициента сорбции кислорода.

Образование хлопьев происходит в результате «слипания» (флокуляции) микробных клеток за счёт выделяемых ими специальных гелеподобных высокомолекулярных соединений, а также – вследствие закрепления клеток на поверхности частичек взвешенных веществ (т.н. механических взвесей), поступающих в аэротенк со сточной водой. Это своеобразный вариант иммобилизации микроорганизмов на твердом носителе и с этой точки зрения активный ил в целом можно рассматривать как массу микробных клеток, закрепленных на частицах механических взвесей. Очевидно, что свойства механических взвесей должны влиять на процесс биологической очистки, тем более, что доля механических взвесей по отношению к приросту микроорганизмов может быть весьма значительной. Практически важными характеристиками механических взвесей в данном процессе являются: размер частиц и их форма, плотность, пористость и сорбционная способность материала, из которого они состоят; содержание минеральных веществ; биостойкость материала (точнее – биоразлагаемость). Последнее свойство особенно важно в том отношении, что биodeградация органической части механических взвесей приводит к накоплению в активном иле минеральных веществ, т.е. к повышению его зольности.

Из изложенного следует, что характеристика механических взвесей, поступающих со сточной водой в аэротенк, это второй (после характеристики водорастворимых загрязнений) фактор, обуславливающий специфичность свойств активного ила, развивающегося на данной сточной воде.

Масса, объем, структура и свойства каждого отдельно взятого «хлопка» постоянно меняются; с одной стороны, он увеличивается за счет размножения на нем микробных клеток и присоединения частиц механических взвесей; с другой – отдельные фрагменты могут отрываться от него в силу механической непрочности структуры и постоянного движения в среде (в аэротенке) под воздействием восходящих потоков воздуха.

Вся масса активного ила в течение длительного времени циркулирует в системе: аэротенк – отстойник – регенератор – аэротенк, являющейся по существу замкнутым контуром, поскольку «приток» (прирост) активного ила, а, следовательно, и «отбор» из этого контура составляют лишь 1-3% от массы циркулирующего ила (в кг/час). К этому следует добавить, что циркулирующий ил постоянно проходит через три резко различающиеся по условиям его существования стадии. В этих условиях неизбежно старение и отмирание части микробных клеток. В итоге в биомассе циркулирующего ила устанавливается некое динамическое равновесие между образованием новых клеток, их старением, отмиранием и биodeградацией мертвых клеток. При любых отклонениях в режимных параметрах процесса равновесие сдвигается в сторону старения, снижения активности и отмирания клеток.

В специальной литературе используют термин «возраст активного ила» и даже предлагается вычислять этот возраст, как период времени, в течение которого

количество вновь образующихся микроорганизмов (за счет ассимиляции органических веществ в аэротенке) становится численно равным количеству активного ила, циркулирующему в системе. Такое определение возраста весьма условно, поскольку при этом исходят из допущения, что из циркуляционного контура выводится в качестве избыточного ила только «старый» ил, в то время, как весь «новый» ил остается в нем. На самом деле это не так: в качестве избыточного ила отбирается пропорционально и старый и новый ил. Фактически возраст ила определяется продолжительностью работы всей системы.

Важнейшей технологической характеристикой является способность активного ила к осаждению (седиментационные свойства ила). Если эта способность нарушается, то это может привести к существенному разлаживанию работы всей системы, а главное – к ухудшению показателей, регламентирующих качество очищенной воды (в основном – содержание взвесей). Поэтому при эксплуатации очистных сооружений эту способность ила регулярно контролируют по показателю, называемому *«иловый индекс»*. Для его определения пробу иловой суспензии (суспензия на выходе из аэротенка) помещают в мерный 1-литровый цилиндр, через 30 минут замеряют объем осадка в см^3 и делят его на число грамм ила в 1 дм^3 . Для нормального, «хорошего» ила он должен составлять от 70 до 120 $\text{см}^3/\text{г}$. Любое отклонение нежелательно.

Существует взаимосвязь между численным значением илового индекса и соотношением потоков возвратного ила и сточной воды. Среди других факторов на седиментационные свойства активного ила существенно влияет характеристика механических взвесей, поступающих со сточной водой, и соотношение их количества ($\text{кг}/\text{час}$) с приростом микроорганизмов ($\text{кг}/\text{час}$).

Физиологическая активность ила является другим важнейшим с точки зрения эффективности очистки воды свойством. В биотехнологии это свойство микроорганизмов принято выражать через показатель «удельная физиологическая активность» (количество органических веществ, ассимилируемых в расчете на единицу массы микроорганизмов в единицу времени); например, применительно к дрожжевым микроорганизмам, используемым в качестве продуцентов белково-витаминной биомассы, удельная физиологическая активность может достигать $1 \text{ г}/\text{г} \cdot \text{час}$; применительно же к биологической очистке сточных вод удельную физиологическую активность ила, возможно, было бы выражать количеством загрязнений в расчете на БПК (БПК_5 , БПК_{20} или БПК_n) в граммах, исчерпываемых в расчете на 1 г сухого вещества ила за 1 час . Но поскольку численное значение этого показателя у ила меняется (снижается) по мере прохождения среды через аэротенк синхронно со снижением концентрации загрязнений, активность ила характеризуют средним (интегральным) значением, рассчитанным путем деления количества загрязнений, поступивших за весь период аэрации в аэротенк, на

количество абсолютно сухого ила, поданного в аэротенк за этот же период. Получаемый результат принято называть удельной нагрузкой ила по БПК (г O_2 БПК₅/г абс. сухого ила).

Обычно она регламентируется. Установлены нормативы нагрузки ила по БПК_{полн}. Численные значения нагрузок зависят в основном от конструктивных особенностей аэротенков и чаще всего составляют от 0,15 до 0,4 г O_2 /г ила. При реальном превышении удельной нагрузки ухудшаются седиментационные свойства ила и увеличивается вынос сго из отстойника с биологически очищенной водой.

2.4 Отстойник

Отстойник, в котором осуществляется отделение ила от биологически очищенной воды, является столь же важной частью системы, сколь и аэротенк. Во-первых, в нем вода очищается от взвешенных веществ (а содержание взвесей в биологически очищенной воде очень жестко регламентируется). Во-вторых, подавляющая часть ила (за исключением прироста) возвращается из отстойника обратно в аэротенк, следовательно, необходимо ил не только сконцентрировать, но и сохранить его физиологическую активность.

В отстойнике микроорганизмы вынуждены существовать в анаэробных (или близких к анаэробным) условиях, поскольку аэрация отсутствует, а остаточная концентрация растворенного кислорода ничтожно мала. В этих условиях облигатно-аэробные микроорганизмы переходят в состояние анабиоза, микроорганизмы – микроаэрофилы продолжают функционировать, метаболизируя те органические вещества, которые поглощены клеткой в аэротенке; факультативно-анаэробные микроорганизмы могут переключаться с аэробного на анаэробное дыхание и выделять в окружающую среду в качестве отходов энергетического обмена не только углекислый газ и воду, но ещё и другие газообразные и водорастворимые продукты. Наряду с этими процессами в микробных клетках могут инициироваться процессы лизиса (самораспада, самопереваривания).

Развитие анаэробных процессов и процессов самораспада крайне нежелательно, поэтому продолжительность отстаивания (точнее – время пребывания ила в отстойнике) не должно превышать 2 часов. Обычно за этот период концентрация ила в осадке (по абс. сухим веществам) может достигать 4-8 г/дм³ и более.

Осадок, выводимый из отстойника, практически целиком возвращают в систему; отбор избыточного осадка (на дальнейшую утилизацию) составляет около 1% по отношению к возвратному осадку.

Вынос ила с биологически очищенной водой из отстойника (т.е. концентрация взвешенных веществ) составляет от 10 до 40 мг/дм³. Если

сопоставить эти цифры с концентрацией активного ила в суспензии, выходящей из аэротенка ($2000-3500 \text{ мг/дм}^3$), то создается представление об очень высокой эффективности очистки воды от взвешенных веществ в отстойнике. На самом деле, если сопоставить вынос активного ила с его приростом в аэротенке, то оказывается, что доля выноса может составлять от 10 до 30% от прироста.

2.5 Регенератор

Как самостоятельный аппарат, регенератор, как правило, в системе отсутствует. Регенерация возвратного ила осуществляется в одной из секций (коридоров) аэротенка. Интенсивность аэрации примерно в 2 раза выше, чем в рабочих коридорах аэротенка.

В процессе прохождения через регенератор восстанавливается аэробное дыхание микроорганизмов и активизируется метаболизм продуктов, образующихся в отстойнике в результате анаэробного дыхания и самораспада части микроорганизмов; одновременно в метаболизм включаются собственные резервные вещества микробных клеток и сорбированные ими загрязнения; в итоге активный ил поступает в рабочую зону аэротенка в активном физиологическом состоянии.

3. О численном соотношении потоков в системе биологической очистки

Численное соотношение потоков представлено на рис. 2, при этом поток исходной сточной воды принят за $100 \text{ м}^3/\text{час}$.

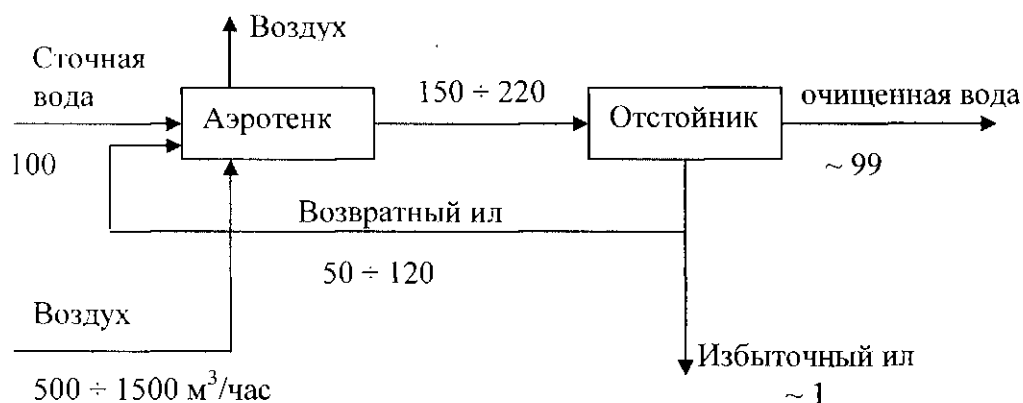


Рис. 2 -- Численные соотношения потоков в системе биологической очистки сточных вод

Нельзя не обратить внимание на то, что количество ила, возвращаемого из отстойников обратно в аэротенк, в 50-120 раз больше, чем количество ила, образующегося в результате очистки сточной воды и отбираемого как избыточный. Столь большой возврат ила и столь широкие пределы варьирования обусловлены в первую очередь стремлением добиться максимального осаждения (и концентрирования) ила в отстойниках и – соответственно – минимального «выноса» ила с биологически очищенной водой.

Количество активного ила (в расчете на абс. сухое вещество) в возвратном потоке может варьировать от 150 до 750 кг/час; общее же количество активного ила, постоянно находящееся в системе, составляет от 2 до 4 тонн на абс. сухое вещество.

Если оконтурить всю систему и абстрагироваться от того, что происходит внутри контура, то видно, что на каждые 100 м³ грязной воды получается около 99 м³ очищенной воды и около 1 м³ жидкого (влажностью 99,2-99,6%) осадка, близкого по составу к природным илистым осадкам. Таков общий итог биологической очистки сточных вод.