

FINNELMA

МАРТТИ НАУККАРИНЕН

Биологическая водоподготовка и потребность в энергии в рыборазведении с установками замкнутого водоснабжения (УЗВ)

1. Тенденции развития

Рыба является холоднокровным животным, и интенсивность ее жизнедеятельности, а также потребность в кислороде регулируются температурой воды. Темп возрастает по мере приближения к оптимальной для каждого вида рыбы температуре. Если оптимальная температура будет превышена, темп может еще и возрасти, но другие риски, например, рыбные болезни будут вызывать проблемы. С этой точки зрения в условиях Финляндии оптимальным периодом выращивания является май–июнь и потом еще период с середины августа до октября. В остальное время года вода или слишком теплая или слишком холодная для обеспечения достаточного роста. В хорошие годы эффективный период выращивания может длиться 6 месяцев, но обычно он немного короче. Регулировка температурой воды стоит дорого, к примеру, на повышение температуры на один градус расхода воды 100 л/сек, что необходимо для содержания в холодное время года около 10 тонн рыбы, выходит выше 400 кВт мощности. На практике (за исключением выращивания личинок) надо довольствоваться той температурой, которую предлагает природа – если не нанять инженера на помощь (когда ничто другое не поможет) и начать сокращать расход воды и применять различные технологии подготовки воды для обеспечения качества воды, в которой содержится рыба. Одним направлением развития промысла является повторное использование и очистка воды. Другое направление придерживается имеющихся технологий и совершенствует характеристики кормов и свойств рыб и выбирает новые виды рыб на выращивание.

2. Рециркуляция воды в рыборазведении

Ограничивающие факторы прироста рыбы можно выявить при помощи испытания, причем уменьшают подвод рециркулируемой воды в рыбный бассейн и устраняют вызванные этим проблемы всегда при помощи технологии.

Первым ограничивающим фактором является кислород. Кислород легко и довольно выгодно использовать. На самом деле рыб можно обеспечить необходимым количеством кислорода даже без обмена воды. Когда рыбы дышат, они расходуют кислород и производят диоксид углерода как продукт горения в количестве 1,38 г за каждую расходуемую грамму кислорода. Накопление диоксида углерода CO_2 в воде бассейна снижает величину рН воды, и когда это продолжается, диоксид углерода начинает превращаться в угольную кислоту. Когда величина рН падает до 5,5, острые проблемы рыб начинают появляться.

Превращение в угольную кислоту предотвращают, например, посредством относительно интенсивной аэрации воды в рыбном бассейне. В воде воздух в виде пузырьков удаляет диоксид углерода и добавляет одновременно кислород, если уровень насыщенности бассейна кислородом ниже 100%. Альтернативно можно подвергнуть аэрации циркулирующую в системе воду, но аэрация в самом бассейне самый эффективный метод. Благодаря данному методу обработки и возможному чистому кислороду, на исходную объемную скорость потока (по сравнению с проточной технологией) расходуется только 1/5–1/10 воды. Данное снижение работает хорошо, если припомнить, что содержание взвешенных веществ в воде не должно излишне увеличиваться. Содержание диоксида углерода не должно превысить 20 мг/л.

Если объемная скорость потока рециркулируемой воды еще уменьшается, накопленный в воде аммиак начинает угрожать благосостоянию и росту рыб. Рыбы выделяют аммиак главным образом через жабры и частично в фекалиях. В свободном, неионизируемом состоянии аммиак даже в малой концентрации ядовит для рыб. Низкая величина рН уменьшает ядовитость аммиака. Когда содержание аммиака увеличивается, используют биореактор как «противоядие». В биореакторе аммоний методом нитрификации сперва превращается в нитрит и далее в нитрат, который в существующих на практике концентрациях является для рыб безопасным составом. Применение биореактора позволяет сократить объемную скорость потока воды, причем общая потребность в воде за один килограмм готовой рыбной продукции составляет около 500–1000 л.

Если водообмен еще сокращают, в системе накапливаются слишком высокие концентрации, что приведет к перегрузке процесса, к снижению эффективности действия биореактора и даже к его отказу. Можно создать почти полностью замкнутую систему рециркуляции воды, подключив к системе еще анаэробную фазу процесса, т.е. денитрификацию, при помощи которой нитрат превращается в свободный азот. Возникающие в результате выращивания взвешенные вещества и осадки используют как источник углерода и в случае необходимости в процесс добавляют метанол для подачи недостающего углерода. Денитрификации подвергается только небольшая часть рециркулируемого потока. Продолжительность задержки составляет порядка двух часов, причем можно создать почти бескислородные условия. Выходящая из реактора вода подвергается фильтрации и аэрации перед подводом обратно по бассейнам. Денитрификация полезна в составе замкнутой системы водоснабжения еще и тем, что она повышает щелочность. Правда, денитрификация должна работать как следует, чтобы она не вызывала увеличение концентрации нитрита.

Применение данного метода требует энергии и оптимализация его применения в целях достижения хороших результатов выращивания за минимальные расходы является важнейшим фактором экономичности установки замкнутого водоснабжения. За счет сокращения общего объема рециркулируемой воды в установке до значений, при которых регулировка температуры воды технически и экономически возможна, можно продолжать выращивание круглогодично. Это сокращает определенные единичные затраты и позволяет

утилизировать, например, отбросную энергию. На практике можно сразу же сократить продолжительность выращивания на половину, т.е. удвоить производительность тех же средств производства.

3. Нитрификационные реакторы, подходящие для аквакультуры

Общее

Так как содержание питательных и взвешенных веществ увеличивается в результате рециркуляции, в биореакторах возникает биопленка, но появляются и нежелательные колонии гетеротрофических бактерий и частицы прилипают друг к другу. Поэтому необходимо выбрать такие типы реакторов, которые обеспечивают постоянное и равномерное распределение потока обрабатываемой воды на разные части биопленки, удобную очистку и сохранение поверхностей несущего вещества относительно чистыми. Так как перекачка, тем или иным способом, необходима для рециркуляции воды, в реакторах стараются создать как можно низкое сопротивление потока. Максимальная удельная площадь несущего вещества уменьшает размер оборудования.

Подводный биоблок-реактор

Это одно из первых коммерческих применений для рыборазведения. Реактор обычно ящикообразный и кубические биоблоки (длинные, типа «папильотки») погружены в нем. Направление потока вверх или вниз, возможно и горизонтально. Удельная площадь порядка $150\text{--}250\text{ м}^2/\text{м}^3$ и поэтому биореактор данного типа занимает довольно много площади. Емкости по своей конструкции, например, бетонные, кубические емкости. Глубина емкости чаще всего несколько метров и ее следует изготовить из жесткого материала. Емкость необходимо время от времени очистить, так как она работает также как фильтр частиц.

Сопротивление потока во время эксплуатации незначительно, так как скорость потока очень медленная.

Капельный орошаемый реактор

Данный тип реактора имеет несколько вариантов и в определенных случаях его размещают последним в серии двух последовательных реакторов, так как данный тип можно кроме основного применения использовать также для растворения кислорода посредством аэрации. Емкость или круглая или квадратная. В нижней части обычно предусмотрена емкость, в которую вода падает через биопакет из фильтрующего материала, находящийся в верхней части над поверхностью воды, или через другой материал, который хорошо брызгает падающую воду. Удельная площадь биопакетов составляет $150\text{--}250\text{ м}^2/\text{м}^3$. Потеря напора при этом около 2,5–4 м, зато напор можно утилизировать для удаления диоксида углерода из воды с помощью аэрации перед возвратом воды в рыбный бассейн.

«Плавучая подушка» с аэрацией

Емкость реактора может быть различной формы в зависимости от места размещения. Как несущее вещество используют, например, разработанные для данного применения пластмассовые шарики, которые обеспечивают как можно большую удельную площадь. Эффективной считается удельная площадь $700\text{--}800\text{ м}^2/\text{м}^3$. Подушку обычно подвергают постоянной, довольно интенсивной аэрации. Также толщина пластмассовой «подушки» зависит от интенсивности аэрации, так как желательно привести всю «подушку» к движению и обеспечить обмен воды. Так как в «подушку» вдувают воздух, она хорошо обеспечена подачей кислорода. Удельный вес «подушек» составляет обычно $0,92\text{--}0,96$ и они плавают так, что их поверхность находится немного выше поверхности воды. Реакторы поставляются в исполнении для горизонтального потока, потока сверху вниз или для потока снизу вверх. Потери потока минимальны, но аэрация «подушки» требует энергии.

Реактор с псевдооживленным (летучим, песочным) слоем

Направление потока вертикального реактора – снизу вверх. Емкость может быть круглой или квадратной формы. Самое важное то, чтобы воду распределяют как можно равномерно, чтобы песочный слой плавал по воде, и чтобы весь слой находился в движении. Это нелегко осуществить в емкостях с широким дном. Коническое дно и другие спецконструкции позволяют привести слой к движению желательным образом. В Финляндии используют емкости пластиковой конструкции (полиэтиленовые емкости ротационного литья) и емкости, армированные стекловолокном. Фракция песка в среднем меньше одного миллиметра, вероятно около $0,5\text{ мм}$. Удельная площадь увеличивается за счет уменьшения фракции, и в теоретическом расчете песок обладает уникальной удельной площадью. На практике все-таки не вся площадь является полезной площадью, так как зерна летучего песка трутся друг о друга и часть биопленки смывается потоком в оборот. Во время эксплуатации песочному слою дают расширяться максимально двукратно. В данном случае сопротивление потока за счет плавания песка равно приблизительно толщине песочного слоя в выражении по водяному столбу. Время задержки в емкости составляет обычно несколько минут. После обработки в летучем слое воду надо подвергнуть аэрации и в нее надо добавить кислород, после чего вода, подаваемая в бассейн, обычно перенасыщена кислородом.

Остальные реакторы

Применяют многочисленные различные типы реакторов, не все они нам даже известны. Биореакторы можно использовать также для механической фильтрации. Тогда подушка остается на месте во время работы, и несущее вещество подвергается бурной обработке при очистке, причем частицы отцепляются и смываются противоточной промывкой. Данный тип реактора подходит хорошо для небольших объектов, например лабораторий. Промывку можно осуществить автоматически, причем она включается таймером или разницей давления.

Во вращающемся биоконтакторе материал, установленный во вращающийся барабан, погружается во время каждого оборота в воду и поднимается из нее, и поверхности впитывают кислород хорошо из воздуха. В пакетах такого типа можно использовать различные материалы, «папильоток» биоблоков, шариков, смежных пластин и т.д. Удельная площадь составляет $200\text{--}300\text{ м}^2/\text{м}^3$.

4. Денитрификация

При денитрификации азот восстанавливается до газа в малоокислородных условиях и удаляется пузырями из обработанной воды. Денитрифирующие бактерии являются гетеротрофическими и нуждаются в углероде. В установках замкнутого водоснабжения рыбоводческих комплексов денитрификационные реакторы размещены обычно как разветвление и их доля в объемной скорости потока всей установки весьма небольшая. Таким образом, удаление азота не влияет значительно на энергетические показатели системы. Углерод подается в реактор, например, в виде метанола.

5. Рассмотрение энергетических показателей оксигенации

5.1 Основы

Оксигенация как целое разделяется на две части – подача кислорода и растворение кислорода в воде.

Температура 22°C

Оцениваем, что более высокая температура приведет к более высокому кормовому коэффициенту, причем исходные данные остаются прежними. Для расчета принимаем кормовой коэффициент 1,35% в сутки. В данном случае количество корма 135 кг в сутки. Если изменение диоксида углерода составляет 10 мг, то получим минимальную объемную скорость потока в бассейне по формуле:

$$Q_{\min} = 1,38 (135 \text{ кг} \times 250000 \text{ мг/кг}) / (10 \text{ мг/л} \times 86400 \text{ сек}) = 1,38 \times 39 \text{ л/сек} = 53,9 \text{ л/сек}$$

Растворение кислорода по тому же принципу как выше приведет к тому же результату содержания кислорода, так как объемная скорость потока увеличилась в том же отношении, как и кормление.

5.2 Оксигенация при помощи напорного оксигенатора

В напорных оксигенаторах чистый кислород смешивается с водой с помощью эжектора или других устройств или методов, создающих много пузырей или капель. Давление воды надо повысить обычно выше 1 бар и вода насыщается кислородом в зависимости от давления и возможной техники обмена газов до значений насыщенности 250–500%, даже выше. Коэффициент полезного действия установки и сравнение результата с энергией перекачки решают окончательные расходы на растворение кислорода.

5.3 Оксигенация с помощью безнапорной колонны

Существует много различных типов безнапорных колонн. Их действие основывается тоже на принципе капания воды или на том, что в воду подают кислород в виде пузырей с помощью энергии падающей воды. Они позволяют на практике достичь степени насыщенности около 200%, если используют чистый кислород. Требуемый напор около 2 метров, т.е. 0,2 бар давления. Коэффициент полезного действия установки и сравнение результата с энергией перекачки решают окончательные расходы на растворение кислорода.

5.4 Оксигенация прямо в рыбном бассейне

Как диффузоры используют, например, керамические оксигенаторы. Если оксигенацию выполняют прямо в рыбном бассейне, коэффициент полезного действия составляет около 50%. Так как весь кислород, употребляемый в установках замкнутого водоснабжения, необходимо тем или иным способом доставить на комплекс, данное значение практически использовать в сравнительных расчетах в качестве основного значения.

5.5 Влияние выбора типа биореактора на потребность в кислороде и перекачку

5.5.1 Капельный орошаемый реактор

В капельном орошаемом реакторе воду дают стечь, например, через сотовую загрузку, причем она аэрируется хорошо и возвращается в оборот насыщенная до 85–90% кислородом. Обычно применяют противоточный метод: вода падает, а воздух течет навстречу вверх.

5.5.2 Реактор с псевдосжиженным (песочным) слоем

В реактор с псевдосжиженным песочным слоем нельзя подавать воздух или кислород, так как газовые пузыри прилипли бы к мелким песчинкам и облегчили бы их вес столько, что они смылись бы потоком из реактора. Вода, подаваемая в реактор данного типа, должна содержать кислород, расходуемый реактором. На практике, объемный поток реактора сменяет воду в реакторе за несколько минут. На основе вышеизложенного расчета оцениваем, что реактор расходует кислород около половины кислорода, расходуемого рыбами.

Расход энергии на перекачку зависит в основном от толщины песочного слоя, и в определенной мере также от фракции песка. В расчетах можно использовать результат умножения толщины песочного слоя на два. Фильтр с псевдосжиженным слоем требует отдельных методов удаления диоксида углерода и добавления кислорода, и окончательный расчет насоса обусловлен данными решениями.

5.5.3 Реактор с подвижным слоем

Реактор с подвижным слоем аэрируется обычно с помощью воздуходувки и труб дисперсии воздуха. Предполагаем, что степень насыщенности составляет 85%. Подача воздуха равна не менее объемной скорости потока воды, и расчет воздуходувки производится на основе глубины емкости реактора. Необходимая высота подпора перекачки для обеспечения течения через реактор с подвижным слоем не менее 0,3–0,5 м.

5.5.4 Реактор со статической летучей подушкой или погружными ячейками

Если несущее вещество находится полностью под водой и вообще не подвергается аэрации, то оно расходует кислород столько же, сколько и псевдосжиженный летучий слой. Течение через фильтр в общеприменимых конструкциях не требует высокого напора, достаточно, что вода медленно течет через вещество. Перекачку рассчитывают на основе статического напора. При реакторе необходимо предусмотреть отдельный метод удаления диоксида углерода и добавления кислорода. Данные решения определяют окончательный расчет насоса.

6. Расход энергии на перекачке

6.1 Напор насоса

Напор влияет линейно на потребность в энергии, если коэффициент полезного действия насоса является неизменным, как и принято в сравнительных расчетах. Важно выбрать подходящий для данного рабочего диапазона насос. Если насос будет работать в постоянном режиме, рекомендуется выбрать насос с как можно максимальным коэффициентом полезного действия, так как при постоянном режиме работы экономия по энергетическим расходам со временем компенсирует более высокие инвестиции в насос.

6.2 Объемная скорость потока

Объемная скорость потока влияет линейно на потребность в энергии, если принять неизменный коэффициент полезного действия насоса. Объемная скорость потока определяется на основе уровня диоксида углерода и потребности в кислороде.

6.3 Коэффициент полезного действия насоса и тип насоса

Коэффициент полезного действия насоса для разных объемных скоростей потока и напоров определяют по характерным кривым насоса и для объекта выбирают обычно насос с наилучшим коэффициентом полезного действия. Принимают во внимание колебание объемной скорости потока и рабочий диапазон насоса. На практике это означает, что различные типы насосов сравнивают, в основном, по их напору. Для низкого напора подходят обычно насосы лопастного типа, и если речь идет только о перемещении воды без значительного ее подъема, можно использовать т.н. мамут-насосы для перекачки воды, т. е. воздуходувки, с помощью которых воздух подается тоже под поверхность воды и поднимающиеся воздушные пузыри перемещают воду с собой.

7. Тепловое хозяйство

7.1 Обмен воздуха

Общепринятое предельное допустимое содержание диоксида углерода в воздухе жилых помещений 1000–1500 ппм. В наружном воздухе содержание около 350 ппм. По расчетам за 100 кг корма возникает $100 \times 500 \text{ г} \times 1,38 = 69000 \text{ г}$ диоксида углерода. Кратность обмена воздуха около $1400 \text{ м}^3/\text{час}$ необходима для разбавления до уровня 1500 ппм.

7.2 Изоляция

Расчет изоляций рыбопроизводного комплекса производится на основе потери тепла через стены. Решающим фактором является все-таки тепловая энергия системы вентиляции и если здание нормально изолировано, нет необходимости в более подробном рассмотрении.

7.3 Рекуперация тепла при обмене воздуха

Обеспечение кратности обмена воздуха $1400 \text{ м}^3/\text{час}$ зимой, если температура наружного воздуха минус 15 градусов мороза и температура в помещениях плюс 18 градусов тепла,

требует тепловой энергии итого: $33 \times 1,2 \text{ кг} \times 1 \text{ кДж/кг} \text{ }^\circ\text{C} \times 1400) / 3600 \text{ сек} = 55440/3600=15,4$ кВт. Рекуперация тепла приносит значительные сбережения затрат, если учесть, что норма кормления составляет не менее 500 кг в сутки в комплексах умеренного размера. Целевое значение рекуперации тепла в обмене воздуха – около 70–80%.

7.4 Подогрев входящей воды

Если необходимо поднять температуру входящей воды, ее следует подогреть с помощью рекуперации тепла. Если расход воды на один килограмм корма составляет около 500 л и если потребляют 100 кг корма, то скорость обмена воды составляет $50 \text{ м}^3/\text{сутки}$ и необходимая мощность для подъема температуры, например, на 20°C составляет 48 кВт.

7.5 Рекуперация тепла

С помощью теплообменника можно рециркулировать около 2/3 тепла, причем необходимая тепловая мощность составляет 16 кВт. Более высокие объемные скорости потока позволяют также более эффективную рекуперацию тепла, но в условиях нормальных, небольших объемных скоростей потока, коэффициент полезного действия уменьшается из-за работы насосов, необходимых для рекуперации.

7.6 Источники тепла

Если рыбопродуктивный комплекс можно разместить при промышленном предприятии, то комплекс может утилизировать отбросную тепловую энергию данного предприятия. Речь идет о различных производственных предприятиях, на которых расходуют много энергии или холодильных мощностей и т.п.

Прямое электрическое или топливное отопление являются, как правило, неэкономичными решениями.

Часто применяют тепловые насосы, которые утилизируют низкие температуры для отбора тепла и передают накопленное тепло на подогрев воды. Они расходуют электроэнергию только одну треть переданной ими энергии.

Значительная часть энергии работающих в комплексе машин передается в виде тепла в помещение, если данные машины размещены внутри здания. Перенос тепла в воду или соответственно предотвращение теплопередачи требуют решений, которые позволяют максимально эффективно утилизировать отбросную энергию в самом комплексе. С другой стороны необходимо вывести излишнее тепло в летнее время.

8. Удаление диоксида углерода

8.1 Потребность в аэрации

Цель аэрации – восстановление баланса газов в рециркулируемой воде. Самая важная задача аэрации – удаление накопленного в воде диоксида углерода и одновременное насыщение кислородом.

8.2 Аэрация в биореакторе

Реактор с подвижным слоем и капельный орошаемый реактор представляют собой аэрирующие биореакторы. В капельном реакторе вода падает через ячейки и поток воздуха, поступающий из противоположного направления, эффективно удаляет диоксид углерода. Соотношение газа/воздуха должно быть не менее 5:1, предпочтительно выше, чтобы обеспечить эффективное удаление диоксида углерода. С учетом взаимодействия удаления диоксида углерода и нитрификации наилучшей альтернативой является капельный реактор.

В реактор с подвижным слоем вдувают воздух, создавая пузыри посредством подачи через летучий слой из пластмассовых шариков. Шарик плавают, и воздух пузырится через них. В случае низкой плотности посадки рыб нормальной аэрации обычно достаточно, но если плотность порядка 100 кг/м^3 , в системе необходимо предусмотреть дополнительное удаление газа. Нормативное количество воздуха – около два раза объем реактора с подвижным слоем в час.

8.3 Аэрация в бассейне

Аэрацию можно выполнить и в самом рыбном бассейне. Разумеется, что в бассейн нельзя устанавливать слишком много аэраторов, так как они мешают содержанию рыб в бассейне. Преимущество данного метода состоит в том, что диоксид углерода удаляется из бассейна по мере возникновения. Применяют или метод прямых пузырей, созданных с помощью диффузоров воздуха, или метод дополнительной циркуляции, причем в эжектор-аэратор накачивают воду из бассейна с давлением около 1 бар, вода подвергается бурной аэрации в резервуаре, расположенном рядом с бассейном, и возвращается в бассейн. Данный метод применяют, когда вода циркулирует в бассейне без биологической очистки. Данный метод самый целесообразный при низких температурах и в замкнутых системах водоснабжения, вероятно, крупных бассейнов.

Количество подачи воздуха воздуходувкой, составляет, например, дважды объем бассейна в час и глубина продувки около 1 метра.

8.4 Аэрация в колонне

Колонны широко применяются для аэрации. Необходимый напор колонны составляет около 2,5 м, и около 3,5 м, если хотят создать пониженное давление для интенсификации удаления газа. Колонны можно использовать также для оксигенации и дезинфекции озоном. Аэрацию можно интенсифицировать, направляя поток воздуха в противоположном направлении. Кроме того, в нижней части колонны можно одновременно выполнить оксигенацию с чистым кислородом, а в верхней части – аэрацию.

9. Взаимозависимость разных факторов

Необходимые действия установок замкнутого водоснабжения:

1) Обмен воды в бассейнах

- для обеспечения качества воды, чтобы концентрации взвешенных веществ, аммиака и диоксида углерода не поднялись до вредного уровня в бассейне;

- для подачи достаточного количества кислорода в бассейн.
- 2) Регулировка температуры
 - для обеспечения круглогодичного прироста
 - для создания оптимальной температуры выращивания
 - 3) Удаление взвешенных веществ из циркуляции
 - для сохранения здоровья рыб, в основном для уменьшения бактерий в жабрах
 - для сведения к минимуму деятельности гетеротрофических бактерий
 - для содержания чистоты поверхностей биореактора.
 - 4) Биологическая подготовка воды
 - для превращения выделенного рыбами аммиака через нитрит в нитрат в процессе окисления и возможное удаление азота.
 - 5) Оксигенация воды
 - для обеспечения рыб и биологической реакции очистки достаточным количеством кислорода.
 - 6) Дезинфекция воды
 - для ограничения размножения вредных бактерий
 - 7) Аэрация воды
 - для удаления диоксида углерода из рециркулируемой воды

Кроме выше упомянутых фаз в цикл можно подключить также удаление азота. Установку удаления азота можно сначала использовать для очистки сточных вод и после того, как освоили метод, вернуть обработанную воду в циркуляцию. В реакторе удаления азота щелочность, т.е. буферная способность воды растет.

10. Заключение

В энергоемких системах водоподготовки стоимость имеет полностью прямолинейное значение. Единственный объект, цена которого играет роль при выборе метода – это повышение насыщенности воды кислородом с помощью чистого кислорода, причем можно сравнить стоимость кислорода, произведенного генератором, и закупленного сжиженного кислорода.

Так как затраты на энергию составляют значительную часть производственных затрат, необходимо сравнить энергопотребителей системы на основе требований и условий данного объекта. Возможную отбросную энергию можно утилизировать для подогрева воды или воздуха в помещениях.

Различные требования к температуре и качеству воды различных видов рыб влияют на принятие решений и, следовательно, и на потребность в энергии.

В итоге можно сказать, что существует много факторов, влияющих на потребность в энергии. Поэтому необходимо тщательно рассмотреть и сравнить разные комбинации.