

В.Н. Ануфриев, к.т.н., доцент кафедры
«Водоснабжение и водоотведение», БНТУ
Е.А. Казанли, старший преподаватель кафедры
«Водоснабжение и водоотведение», БНТУ

РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД С ДЕНИТРИФИКАЦИЕЙ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ТКП 45-4.01-202-2010

Экологические проблемы, связанные с эвтрофикацией природных водных объектов, стали темой многочисленных научных исследований, предметом международных природоохранных программ. Данная проблема является актуальной и для Беларуси. Поступление биогенных питательных элементов, в том числе соединений азота и фосфора, в водные объекты приводит к процессам быстрого размножения и развития водорослей, что резко осложняет экологическую ситуацию в водных экосистемах. Повышение температуры в летний период года также интенсифицирует этот процесс, и, как результат, изменяется цветность воды, появляется слой пены из водорослей и их остатков, угнетается жизнедеятельность других водных организмов, в том числе рыб. Такие явления наблюдались за последние годы на ряде водных объектов, в частности, информация о «цветении» Вилейского водохранилища в августе 2011 г. приводилась многими средствами массовой информации /1/ (рис. 1).



Такого же рода процессы происходят и в акватории Балтийского моря, вызывая озабоченность общественности в странах данного региона. Причиной данного явления является поступление биогенных веществ в воды Балтики, в том числе и за счет их выноса речной водой с территории Республики Беларусь. В связи с чем существует ряд международных проектов, а также разрабатываются новые программы и мероприятия с участием белорусских организаций и предприятий по уменьшению выноса биогенных веществ в Балтику. Одним из направлений решения данной проблемы является повышение степени очистки от биогенных элементов сточных вод, отводимых в водотоки.

При проектировании современных очистных сооружений, как правило, рассматривается задача удаления из сточных вод биогенных элементов, в том числе азота, так как к настоящему времени принят ряд нормативных документов, ограничивающих концентрации соединений



Рис. 1. Признаки проявления процессов эвтрофикации в водохранилище

азота в отводимых с очистных сооружений сточных водах /1/. Принятый в 2011 году ТКП 45-4.01-202 /2/ содержит ряд зависимостей и положений, которые позволяют производить определение параметров сооружений биологической очистки с денитрификацией. Вместе с тем, считаем целесообразным для упрощения использования новых нормативов привести более детальные рекомендации по расчетам таких систем.

Первым шагом при проектировании очистных сооружений является установление их мощности по эквивалентному населению и оценка необходимости использования денитрификации. По действующим природоохранным нормативам /2/ требования по концентрациям азота общего установлены для очистных сооружений с суточной нагрузкой более 10 000 эквивалентов, или более 600 кг БПК₅ в сутки.

Следующим шагом является выбор технологической схемы. Учитывая многообразие технических решений для реализации денитрификации, мы не ставим задачу в рамках данной статьи произвести анализ области их применения с учетом всех исходных данных. Данной проблеме посвящен большой объем технической литературы /4, 5, 6, 7/, из которой следует, что такой выбор в значительной мере может основываться на практике проектирования, сложившейся в той или иной стране. Поэтому в каждом случае такой выбор должен производить проектировщик, обосновывая его комплексом исходных данных и технико-экономических требований. С другой стороны, следует отметить, что при разнообразии технологических схем многие из них являются вариациями предварительной денитрификации, которая используется в большей мере на сооружениях средней и большой производительности. Поэтому для примера рассмотрим схему предварительной денитрификации (рис. 2) и порядок ее расчета.

Расчет сооружений биологической очистки производится на основании исходных данных по БПК₅, содержанию азота аммонийного и нитратного в сточной воде, поступающей на биологические очистные сооружения, а также с учетом требований к БПК₅, азоту общему и аммонийному в очищенной сточной воде.

Для назначения степени очистки используются требования /2/. Например, для очистных сооружений с суточной нагрузкой более 10 000 эквивалентов в среднем содержание азота общего не должно превышать 15 мг/дм³, при максимальной допустимой концентрации не более 20 мг/дм³. Представляется рациональным при проектировании вести расчет на более «жесткие» (порядка на 10–12 мг/дм³) расчетные концентрации азота в очищенной воде для обеспечения некоторого уровня надежности при последующей эксплуатации с учетом неравномерности поступления сточных вод и колебаний концентрации загрязняющих веществ в них.

Далее устанавливается расчетная температура сточных вод, при которой производится очистка. В данном случае в качестве расчетной устанавливается минимальная температура сточных вод в холодный период года. Наименьшей температурой, при которой происходит нитрификация, считается значение 10 °С. При меньших значениях протекание процессов нитрификации может быть неустойчивым /2/.

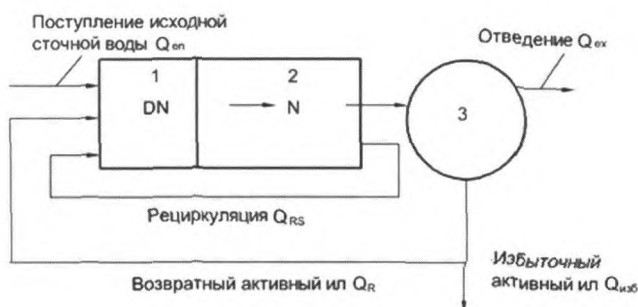


Рис. 2. Схема сооружений предварительной денитрификации:
1 — нитрификатор; 2 — денитрификатор

Значения возраста ила для температуры 10 °С и 12 °С приведены в таблице 7.11 ТКП 45-4.01-202. При значениях температур более 12 °С для систем с нитрификацией и денитрификацией возраст ила рассчитывается по зависимости:

$$t_{TS}^{N+D} = 3,4K_3 \cdot 1,103^{(15-T)} \frac{1}{1 - \{V_D/V_D + V_N\}}, \quad (1)$$

где K_3 — коэффициент, учитывающий колебания концентрации соединений азота и величины pH в сточных водах, поступающих на сооружения биологической очистки;
 T — расчетная температура сточных вод, °С;
 V_D — объем денитрификатора, м³;
 V_N — объем нитрификатора, м³.

Для сооружений с нагрузкой по БПК₅ значение K_3 принимается:

- до 1200 кг/сут — 1,8;
- более 6000 кг/сут — 1,45;
- в интервале 1200–6000 кг/сут — интерполяцией.

Дальнейший шаг расчетов — определение концентрации азота нитратов, подлежащего денитрификации C_{NO_3D} , мг/дм³, которое определяется по балансовому уравнению азота в системе (ТКП 45-4.01-202, формула 7.42):

$$C_{NO_3D} = C_{Nen} - C_{orgNex} - C_{NH_4ex} - C_{NO_3ex} - X_{orgN,BM}, \quad (2)$$

где C_{Nen} — содержание азота общего в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, мг/дм³;
 C_{orgNex} — содержание азота органических веществ в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников, мг/дм³;
 C_{NH_4ex} — содержание азота аммонийного в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников, мг/дм³;
 C_{NO_3ex} — содержание азота нитратного в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников, мг/дм³;
 $X_{orgN,BM}$ — азот органических веществ, поступающий в биомассу активного ила, мг/дм³.

При расчетах содержание азота общего и БПК₅ в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, следует принимать с учетом их снижения после первичного отстаивания по п. 4.4 ТКП 45-4.01-202.

Содержание азота органических веществ в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников, при очистке бытовых сточных вод принимается 2 мг/дм³. При отведении производственных сточных вод, содержащих трудноокисляемые органические примеси, данный параметр может иметь более высокое значение, которое следует учитывать при расчетах.

Содержание азота аммонийного в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников, принимается исходя из природоохранных требований, при их наличии. Если требования к концентрации азота аммонийного отдельно не устанавливаются и его концентрация рассматривается в сумме с другими формами азота, следует рассматривать как расчетную концентрацию азота аммонийного, достигаемую при денитрификации, порядка 5 мг/дм³ (Приложение В.1 ТКП 45-4.01-202). При более жестких требованиях к содержанию указанного загрязняющего вещества требуется снижение нагрузки на активный ил (Приложение В.2 ТКП 45-4.01-202) и, как следствие, увеличение размеров емкостных сооружений.

Содержание азота нитратного в сточной воде, отводимой после вторичных отстойников при предварительной денитрификации, определяется соотношением азота нитратов, подлежащих удалению, к величине БПК₅ сточной воды, а также величиной рециркуляции иловой смеси, направляемой из нитрификатора в денитрификатор.

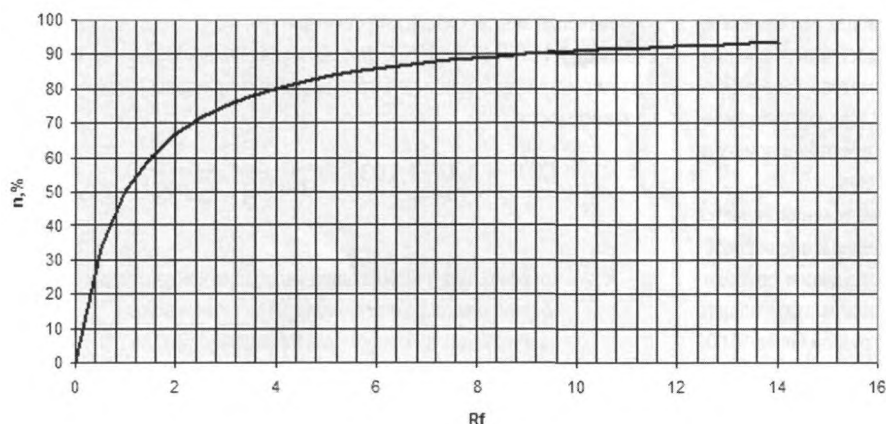


Рис. 3. График зависимости возможной степени удаления соединений азота n (%) от кратности рециркуляции R_f

Как видно из графика (рис. 3), удаление азота нитратов составляет 70 % при кратности рециркуляции 250 %, для увеличения степени удаления до 80 % кратность рециркуляции требуется повысить до 400 %. Таким образом, назначение степени удаления азота нитратов и кратности рециркуляции требует технико-экономического расчета для оптимизации конструктивных параметров сооружений и эксплуатационных характеристик.

Другой показатель, определяющий конструктивные параметры сооружений, выражается через отношение концентрации азота нитратов, подлежащих к денитрификации, к величине БПК₅ сточной воды. В зависимости от величины C_{NO_3D}/L_{en} определяется отношение объема денитрификатора к суммарному объему нитрификатора и денитрификатора V_D/V (ТКП 45-4.01-202, таблица 7.12). Предельное значение C_{NO_3D}/L_{en} не должно превышать 0,15. При больших значениях возникают проблемы с обеспечением процесса денитрификации, вызванные дефицитом органических веществ, необходимых для жизнедеятельности активного ила.

Далее определяется суммарный объем технологических сооружений с активным илом, V м³, по зависимости:

$$V = \frac{t_{TS} P_i}{a_i}, \quad (3)$$

где a_i — доза ила, г/дм³

t_{TS} — возраст активного ила, сут

P_i — прирост активного ила, кг/сут.

Прирост активного ила на очистных сооружениях P_i , кг/сут, принимается по ТКП 45-4.01-202, таблица 7.15 в зависимости от отношения содержания взвешенных веществ к БПК₅ сточной воды, поступающей на биологическую очистку при его значениях 0,4-1,2, возрасте ила от 4 до 25 сут, для температур 10-12 С. Для других значений параметров, прирост активного ила рассчитывается по формуле:

$$P_i = \frac{Q_{расч} L_{en}}{1000} (0,75 + 0,6 \frac{C_{en}}{L_{en}} - \frac{0,102 t_{TS} 1,072^{(T-15)}}{1 + 0,17 t_{TS} 1,072^{(T-15)}}), \quad (4)$$

где $Q_{расч}$ — среднесуточный расход сточных вод, м³/сут;

L_{en} — БПК₅ сточных вод поступающих на очистку, мг/дм³

C_{en} — концентрация взвешенных веществ в сточной воде, поступающей на биологическую очистку, мг/дм³;

t_{TS} — возраст активного ила, сут

T — температура иловой смеси, °С.

Полученный объем сооружений биологической очистки проверяется на соответствие допустимой объемной нагрузке B_R и нагрузке на ак-

тивный ил B_{TS} , которые не должны превышать значений, указанных в ТКП 45-4.01-202, таблица 7.14. При соответствии допустимым нагрузкам далее определяются объемы нитрификатора и денитрификатора исходя из полученного суммарного объема и отношение денитрификатора к общему объему технологических емкостных биологических сооружений для предварительной денитрификации, принимаемой по ТКП 45-4.01-202, таблица 7.12. Далее по объемам нитрификатора и денитрификатора проектируются конструкции данных технологических сооружений. Определяется степень рециркуляции R_F потока иловой смеси из нитрификатора в денитрификатор исходя из необходимой степени удаления азота нитратов η_D :

$$\eta_D = 1 - \frac{1}{1 + R_F}. \quad (5)$$

Расход рециркуляции иловой смеси из нитрификатора в денитрификатор рассчитывается учетом расхода циркуляционного активного ила из вторичных отстойников:

$$R_F = R_S + R, \quad (6)$$

где R — степень рециркуляции активного ила из вторичных отстойников;

R_S — степень рециркуляции потока иловой смеси из нитрификатора в денитрификатор.

Расход циркуляции иловой смеси из нитрификатора в денитрификатор определяется по формуле:

$$Q_S = R_S \cdot Q, \quad (7)$$

где R — средний часовой расход сточных вод, м³/ч.

Величину внутренней рециркуляции иловой смеси не следует увеличивать более необходимой для достижения требуемой степени денитрификации, во избежание увеличения выноса растворенного кислорода и снижения расхода электроэнергии на перекачку иловой смеси.

Циркуляция иловой смеси может производиться центробежными насосами или другими устройствами. Наиболее распространенными устройствами для перекачки иловой смеси являются так называемые рециркуляционные насосы. Конструкция таких устройств представляет собой погружную пропеллерную мешалку смонтированную в направля-

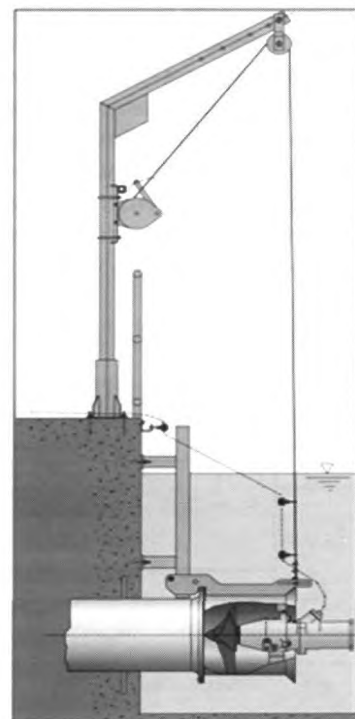


Рис. 4. Пример монтажа рециркуляционного насоса в нитрификаторе

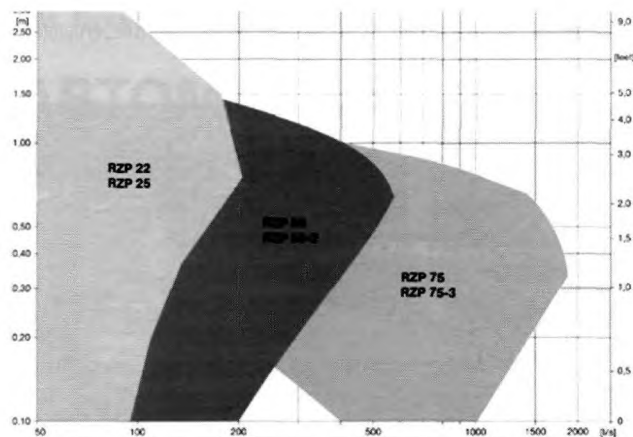


Рис. 5. Характеристики рециркуляционных насосов /7/

ющей трубе, по которой производится подача иловой смеси (Рис. 4). Эти устройства характеризуются большими подачами при небольших напорах (1–3 м) и позволяют осуществлять эксплуатацию систем денитрификации с меньшими энергозатратами в сравнении с другими устройствами. Для регулирования подачи может использоваться частотный привод скорости вращения пропеллеров. Подбор рециркуляционных насосов осуществляется аналогично как и центробежных, по требуемой подаче и напору. Пример сводного графика рабочих полей рециркуляционных насосов приведен на рис. 5.

Еще одна особенность систем с денитрификацией связана с проектированием систем аэрации. Потребность в кислороде для очистки сточной воды, кг/сут, определяется как сумма расхода кислорода на деструкцию органических веществ и нитрификацию с учетом снижения потребности в кислороде за счет окисления органических веществ при денитрификации по уравнению:

$$OV = OV_c + OV_N - OV_D, \quad (8)$$

где OV_c — расход кислорода на деструкцию органических веществ, кг/сут;

OV_N — расход кислорода на нитрификацию, кг/сут;

OV_D — снижение потребности в кислороде за счет окисления органических веществ при денитрификации, кг/сут.

Удельный расход кислорода на деструкцию органических веществ, кг/кг, БПК₅ принимается по ТКП 45-4.01-202, таблица 7.16 с учетом температуры и возраста ила при ХПК/БПК₅ до 2,2. Для других значений возраста ила и температуры расход кислорода на обработку сточной воды с целью деструкции органических веществ, кг/сут, следует рассчитывать по зависимости:

$$OV_c = B_{\text{сут}} \left(0,56 + \frac{0,15a_i \times 1,072^{(T-15)}}{1 + 0,17a_i \times 1,072^{(T-15)}} \right), \quad (9)$$

где $B_{\text{сут}}$ — суточное поступление биохимически разлагаемых веществ на очистные сооружения, кг БПК₅/сут.

Расход кислорода на нитрификацию, кг/сут, рассчитывается по уравнению:

$$OV_N = Q_{\text{расч}} \times \frac{4,3(C_{\text{NO}_3\text{D}} - C_{\text{NO}_3\text{en}} + C_{\text{NO}_3\text{ex}})}{1000}. \quad (10)$$

Снижение потребности в кислороде OV_D , кг/сут, за счет окисления органических веществ в анаэробных условиях при денитрификации определяется по зависимости:

$$OV_D = Q_{\text{расч}} \times \frac{2,9C_{\text{NO}_3\text{D}}}{1000}. \quad (11)$$

Максимальная часовая потребность в кислороде, кг/ч, с учетом неравномерности его потребления в течение суток рассчитывается по зависимости:

$$OV_h = \frac{k_c(OV_c - OV_D) + k_N OV_N}{24}, \quad (12)$$

где k_c — коэффициент часовой неравномерности потребления кислорода при обработке сточной воды с целью деструкции органических веществ;

k_N — коэффициент часовой неравномерности потребления кислорода при нитрификации.

Величины коэффициентов часовой неравномерности потребления кислорода k_c и k_N принимаются ТКП 45-4.01-202, таблица 7.17.

Требуемая подача воздуха в технологические емкости с активным илом при аэрации рассчитывается исходя из растворимости кислорода, требуемой концентрации кислорода в иловой смеси и характеристик аэраторов. Характеристики аэраторов приведены в ТКП 45-4.01-202, приложение Д. При этом для более корректного проектирования аэрационных систем следует использовать характеристики аэраторов, приводимых в документации производителей.

Использование схемы предварительной денитрификации может применяться не только при строительстве новых очистных сооружений, но и при реконструкции существующих. Например, вышеприведенные принципы использовались при реконструкции очистных сооружений г. Люблина в Польше, учитывая, что построены данные сооружения по советским типовым проектам, которые использовались и для строительства очистных сооружений на территории Беларуси. Объем сооружений биологической очистки разделялся на нитрификаторы и денитрификаторы. Денитрификаторы оборудовались

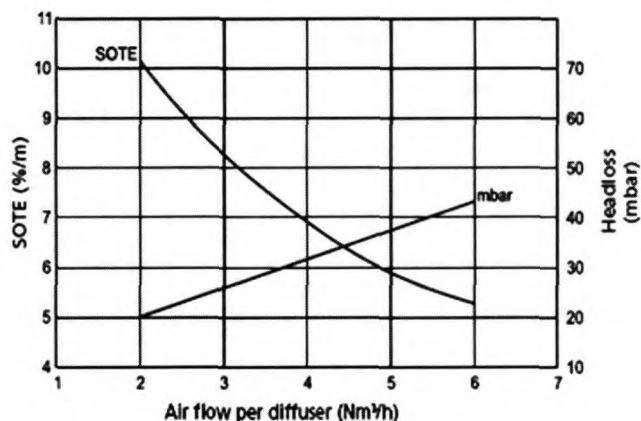


Рис. 6. Вид аэратора и характеристика тарельчатого аэратора /9/

низкоскоростными мешалками. Подача нитрифицированных сточных вод из нитрификатора предусматривалась рециркуляционными насосами,

установленных на трубопроводах, которые смонтированы в перегородках, разделяющих коридоры аэротенков (рис. 7–9).



Рис. 8. Погружная мешалка типа MAXIPROP, установленная в реконструируемой секции биологических емкостей



Рис. 7. Вид очистных сооружений г. Люблина с высоты птичьего полета



Рис. 9. Рециркуляционный насос WILoEMU RZP

Учитывая, что проектирование систем денитрификации является для отечественной практики относительно новым направлением, для повышения доступности методик расчетов разработан проект ТКП «Очистные сооружения сточных вод. Правила проектирования». В настоящее время проект

ТКП проходит согласования в установленном порядке. Введение данного документа позволит использовать накопленный европейский опыт проектирования для строительства систем очистных сооружений, отвечающих современным требованиям к эффективности очистки сточных вод.

Литература и использованные источники информации

1. <http://ex-press.by/article.php?id=11430>
2. Инструкция о порядке установления нормативов допустимых сбросов химических и иных веществ в водные объекты. Утверждена постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 29.04.2008 № 43, с изменениями и дополнениями, утвержденными постановлением Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь 29.12.2009 № 71.
3. ТКП 45-4.01-202-2010 (02250) «Очистные сооружения сточных вод. Строительные нормы проектирования».
4. R. Kayser. ATW-DVWK-Kommentar Bemessung von Belebungs- und SBR-Anlagen, Braunschweig 2000.
5. Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. ATW-DVWK A-131. Hennef 2000. 46 s
6. W. Bischof Abwassertechnik Stuttgart 1993 630 s.
7. Хенце М., Армоэс П., Янсен И., Арвин Э. Очистка сточных вод. Биологические и химические процессы. — М. «Мир», 2004. — 480 с.
8. Recirculation pumps Wilo AG 2006 15 s/
9. Zenit. Aeration and mixing systems. Product catalog. 2010/3 10 s/