

УДК 628.3:658.26.004.18

Энергосбережение и альтернативная энергетика на очистных сооружениях канализации

Д. А. ДАНИЛОВИЧ*

** Данилович Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, главный технолог ОАО «МосводоканалНИИпроект», заместитель исполнительного директора РАВВ 105005, Россия, Москва, Плещеевский пер., 22, тел.: (499) 261-53-84, e-mail: da_danilovich@mail.ru*

Проанализированы пути повышения энергоэффективности городских очистных сооружений канализации и выработки тепла и электроэнергии с использованием возобновляемых энергоресурсов сточных вод. Проведенный анализ путей энергосбережения и энергогенерации в водопроводно-канализационном хозяйстве показывает, что в зависимости от применяемых технических решений общий энергетический баланс может различаться (применительно к расходу сточных вод 100 тыс. м³/сут) от чистого потребления 4 МВт электрической мощности до производства 7,5–8 МВт (за счет выработки до 16 МВт, в том числе до 1 МВт электроэнергии). Сооружения очистки городских сточных вод в зависимости от выбранных технических решений могут различаться по энергопотреблению более чем в 6 раз.

Ключевые слова: водопроводно-канализационное хозяйство, энергопотребление, энергоэффективность, очистные сооружения, сточные воды, осадок, тепловые насосы, биогаз, электроэнергия.

Methods of improving power efficiency of the municipal wastewater treatment facilities and heat and electrical power generation with the use of renewable power resource of wastewater. The analysis of power conservation and generation in water supply and wastewater management shows that depending on the technical solutions applied the total balance of power consumption at the water and wastewater facilities can vary from the net electrical energy consumption of 4 MW per 100 000 m³ of wastewater/day to positive balance of 7,5–8 MW (owing to 16 MW power generated including 1 MW of electrical energy). The power consumption of two independent municipal wastewater treatment plants can differ more than 6 times.

Key words: water supply and wastewater management, power consumption, power efficiency, wastewater treatment facilities, wastewater, sludge, heat pumps, biogas, electrical energy.

Водоснабжение, транспортировка и очистка сточных вод являются весьма энергоемкими процессами. В современных условиях стоимость потребляемой предприятиями водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) электрической и тепловой энергии, а также топлива составляет значительную часть себестоимости продукции.

Общая электрическая мощность, потребляемая ВКХ города с умеренно выраженным рельефом для расхода 100 тыс. м³/сут воды, составляет (по ориентировочным расчетам) в среднем около 4000 кВт, в том числе на водоподготовку и подачу питьевой воды требуется средняя мощность 2300 кВт, на перекачку сточных вод – 600 кВт и

очистку сточных вод – от 700 до 1900 кВт. Здесь и далее все удельные расчеты будут приведены к вышеуказанной производительности, характерной для предприятий ВКХ многих российских областных центров.

Энергоемкость предоставления коммунальных услуг в России, к сожалению, существенно превосходит аналогичный средний показатель в странах со сходным климатом. Поэтому снижение энергозатрат в настоящее время является приоритетной задачей. С этой целью в России законодательно были ужесточены требования к энергоэффективности. В ноябре 2009 г. вступил в силу Федеральный закон № 261-ФЗ «Об энер-

госбережении и повышении энергетической эффективности», который обозначил не только первоочередные направления повышения энергоэффективности, но и сроки внедрения соответствующих мероприятий.

Безусловно, планируя внедрение энергосберегающих мероприятий, не следует забывать очевидную истину, что экономия энергии — не самоцель и должна оцениваться с учетом экономической эффективности в целом. При переносе зарубежного опыта в российские условия необходимо учитывать, что в ЕС созданы гораздо более благоприятные для энергосбережения и альтернативной энергетики экономические условия, вплоть до применения двукратного повышающего коэффициента к стоимости «зеленой» электроэнергии. Отсутствие подобных стимулирующих механизмов в отечественной практике может существенно ухудшить декларируемые по результатам зарубежного опыта экономические показатели энергосбережения.

Наиболее значительное количество электроэнергии в ВКХ расходуется на подачу питьевой воды потребителям, перекачку сточной воды и очистку сточных вод.

Основными направлениями сокращения энергозатрат на подачу питьевой воды является регулирование расходов и напоров в сети, а также снижение потерь воды. Традиционные технологии водоподготовки потребляют относительно немного энергии, причем их совершенствование в большинстве случаев приводит к увеличению энергозатрат за счет перехода на технологии озонирования и мембранной фильтрации. Возможности генерации энергии в этой сфере весьма ограничены и во многом сводятся к созданию мини-ГЭС на водохранилищах поверхностных водоисточников, а также локальных систем отопления промышленных зданий с использованием тепловых насосов.

Значительно большие возможности для энергосбережения в технологическом процессе и энергогенерации обеспечивают коммунальные очистные сооружения, которым и посвящена настоящая статья. Задачей автора являлось, прежде всего, обобщение в единую картину более или менее известных способов улучшения энергобаланса очистных сооружений.

Наиболее распространенная в России классическая технологическая схема очистных сооружений с первичными отстойниками, аэротенками и вторичными отстойниками является исключительно энергозатратной. Сооружения производительностью 100 тыс. м³/сут сточной воды, содержащей 200 мг/л взвешенных веществ

и 180 мг/л БПК₅, потребляют на производственные нужды около 700 кВт электрической мощности. При более полном технологическом процессе, обеспечивающем соблюдение современных нормативных требований, среднесуточная потребляемая электрическая мощность возрастает до 1500—1900 кВт, в том числе:

при глубоком окислении аммонийного азота (при его исходной концентрации 30 мг/л) — на 300—500 кВт;

при УФ-обеззараживании очищенных вод — на 150—200 кВт;

при аэробной стабилизации осадка — на 300—400 кВт;

при механическом обезвоживании осадка на центрифугах — на 50—70 кВт.

Направления энергосбережения на очистных сооружениях

Основными направлениями технологического энергосбережения является использование:

энергоэффективных технологий;

энергоэффективных инженерных решений;

приемов и оборудования для регулирования работы сооружений и оборудования.

Многочисленные способы энергосбережения в зданиях и сооружениях (лампы, терморегуляторы, утепление и т. д.) также имеют существенное значение для энергобаланса, но в данной статье не обсуждаются. Рассмотрим способы реализации перечисленных выше направлений энергосбережения.

Энергоэффективные технологии

Поскольку на очистных сооружениях основное количество энергии тратится на биохимическое окисление загрязнений сточных вод, доля окисляемых загрязнений должна жестко ограничиваться. Важнейшим технологическим инструментом для этого ограничения являются первичные отстойники. При реализации классической технологии очистки в аэротенки следует подавать как можно более глубоко осветленную сточную воду. В 1990-х годах загрязненность коммунальных сточных вод, поступающих на многие российские очистные сооружения, существенно снизилась, что повлекло за собой уменьшение концентрации БПК₅ в осветленной воде до 50—60 мг/л, однако, это не оказало негативного влияния на процессы биологической очистки. В условиях сложившегося состава сооружений для повышения эффективности осветления рекомендуется эксплуатировать первичные отстойники с минимальным (нулевым) уровнем залегания осадка на днище.

При переводе очистных сооружений на глубокое окисление аммонийного азота затраты электроэнергии на аэрацию могут вырасти до двух раз по следующим основным причинам:

непосредственно на процесс окисления, например 10 мг/л аммонийного азота, требуется до 45 мг кислорода, что приводит к необходимости дополнительной подачи воздуха (примерно на 50% больше, чем в обычном режиме);

устойчивая нитрификация требует более высоких значений концентрации растворенного кислорода, чем простое окисление органических загрязнений. Это приводит к ухудшению растворимости кислорода в иловой смеси на 10–15%;

достижение остаточных концентраций аммонийного азота 0,4–1 мг/л требует значительно большего времени обработки при невысокой скорости процесса окисления, что, как правило, снижает эффективность использования кислорода воздуха, подаваемого в данную зону аэротенка.

С точки зрения энергосбережения в усовершенствованной технологии очистки воды особенно важна стадия денитрификации. Потребление нитратов с использованием в качестве субстрата загрязнений поступающей сточной воды позволяет не только снизить концентрации нитратов до ПДК (а это по действующей системе оплаты за сброс загрязняющих веществ, к сожалению, не так уж и существенно с экономической точки зрения), но и вернуть 2/3 кислорода (т. е. электроэнергии!), потраченного на нитрификацию. Для этого достаточно провести реконструкцию аэротенка с выделением в его начальной части зоны перемешивания и организацией в нее рецикла из конца последнего коридора аэротенка. Впервые в России в большом промышленном масштабе такая реконструкция аэротенков была проведена в 1998 г. на Люберецких очистных сооружениях Москвы, где в рамках ремонтных работ по замене аэрационных систем всего за несколько месяцев был реализован процесс нитри-денитрификации на сооружениях производительностью 200 тыс. м³/сут [1]. Это позволило не только достичь ПДК по аммонийному и нитратному азоту, но и с учетом эффективности новых аэрационных систем на 20–30% сократить расход подаваемого воздуха. Таким образом, решая актуальную проблему очистки воды от аммонийного азота, совершенно не обязательно двукратно увеличивать энергопотребление аэротенков.

На многих сооружениях в России был реализован метод аэробной стабилизации осадков. Наряду с положительным технологическим эффектом (многократное снижение выделения не-

приятных запахов от осадка) применение этого метода влечет за собой повышение потребления электроэнергии на очистных сооружениях до 25%. С точки зрения энергосбережения использование аэробной стабилизации в современных условиях может быть оправдано только на небольших очистных сооружениях.

В настоящее время практически безальтернативным методом экологически безопасного обеззараживания очищенных сточных вод является ультрафиолетовое облучение. Однако оно также существенно увеличивает затраты электроэнергии – на 20–30%. Снизить этот прирост можно путем уменьшения концентрации взвешенных веществ в очищенной воде, что достигается предварительной фильтрацией биологически очищенной воды.

Энергоэффективные инженерные решения

Это направление снижения энергозатрат целесообразно рассматривать не только как применение оборудования с высокими значениями КПД, но в более широком смысле: использование оборудования, которое в силу своих технических особенностей решает поставленную задачу с меньшим энергопотреблением.

Наиболее существенный вклад в снижение энергозатрат могут внести аэрационные системы. Общеизвестно преимущество мелкопузырчатых аэраторов: чем мельче пузырьки газа и чем больше путь этого пузырька до поверхности, тем выше растворение в иловой смеси кислорода воздуха. При этом следует отметить, что наличие такого физического явления, как коалесценция (слипание) пузырьков воздуха, ограничивает глубину целесообразного диспергирования и вообще существенно усложняет процессы, происходящие в этих системах.

Оборотной стороной использования мелкопузырчатых диспергаторов является их кольматация (забивание). Этот процесс наиболее выражен в пористых объемных диспергаторах (выполненных из спеченных минеральных порошковых материалов либо сплавленных пластиковых нитей), когда они работают сверх оптимального срока службы, либо в них подается неотфильтрованный запыленный воздух. В такой системе давление воздуха возрастает до пределов мощности воздуходувок (расход соответственно падает). При наличии такой возможности, службы эксплуатации вынуждены подключать дополнительный воздуходувный агрегат. При использовании традиционных фильтросных пластин это приводит к вырыванию пластин и резкому снижению эффективности аэрации. Современ-

ные аэраторы такого типа конструктивно более защищены от негативных последствий вырываний (но не от проблем с кольматацией).

Причинами снижения эффективности мембранных диспергаторов являются:

заращение как внутренней, так и наружной поверхности мембранных диспергаторов отложениями биологического и химического происхождения. С этим явлением можно бороться, используя установки по распылению в воздуховодах растворов слабых органических кислот. Этот прием весьма распространен за рубежом. В России такое оборудование не производится и пока не применяется. Кроме того, метод требует использования воздуховодов, устойчивых к действию слабых кислот;

необратимая (как правило, асимметричная) деформация, в результате которой растянувшаяся часть мембраны пропускает почти весь расход воздуха с гораздо большей нагрузкой, а оставшаяся часть практически не задействуется.

В ходе эксплуатации мембранных диспергаторов происходит существенное (до двух и более раз) снижение эффективности растворения. Наиболее выражено оно происходит у диспергаторов из материала EPDM, наименее — у диспергаторов из спеченных пористых материалов. Это определяет эффективный срок их службы соответственно 4–5 и 10 лет. У диспергаторов из пористых спеченных материалов скорость снижения эффективности меньше, однако их производство в России практически прекращено. Также следует отметить, что традиционный способ их применения (укладка на раствор в каналы на днище аэротенка) не обеспечивает надежной работы (защиты от вырываний). Зарубежные производители предлагают достаточный выбор керамических пористых диспергаторов, однако их стоимость существенно выше.

Замена закольматированной старой системы аэрации новой эффективной позволит сэкономить до 50% электроэнергии, затрачиваемой на аэрацию (либо при невозможности регулирования подачи воздуха, что актуально для многих сооружений, — значительно повысить эффективность очистки сточных вод). При выборе новой аэрационной системы следует внимательно изучить опыт применения предлагаемых решений. На российском рынке присутствуют аэрационные системы, эффективность которых весьма существенно падает уже через 2–3 года эксплуатации.

Изначальным фактором, оказывающим влияние на энергоэффективность мелкопузырчатой аэрации, является нагрузка на диспергатора. При

нагрузке свыше оптимальной воздух выходит из пор со слишком большим расходом, в результате чего диаметр пузырька увеличивается. При этом пропорционально снижается эффективность аэрационной системы.

К сожалению, практически повсеместно в России количество устанавливаемых аэраторов не соответствует критериям энергоэффективности. Это объясняется нехваткой средств (или неразумной их экономией) при строительстве очистных сооружений или реконструкции аэрационных систем. Существенным негативным фактором также является упрощенное применение конкурсной процедуры выбора поставщика аэрационных систем (либо подрядчика по аэрационным системам в целом). Решение выносится в пользу претендента, предложившего наименьшую цену за комплект аэрационной системы. При этом крайне редко такому заказу предшествует корректный расчет потребности аэротенков в воздухе. Такой подход вынуждает поставщиков закладывать в свои решения повышенные нагрузки на аэраторы, снижающие их эффективность.

Расчеты показывают, что техническое решение с установкой энергетически оптимального количества аэраторов окупается за 1,5–2 года. Чтобы реально воспользоваться этим выигрышем, следует иметь достаточно гибкую систему подачи воздуха в аэротенки. Если на сооружениях всего две рабочие воздуходувки, на них трудно что-либо сэкономить.

Другим существенным проектным фактором является использование адекватной схемы раскладки аэраторов по днищу аэротенков, соответствующей потребности процесса в кислороде. Это особенно актуально для распространенной в России и странах СНГ коридорной схемы аэротенков. Некорректная раскладка, при которой в отдельных зонах будет больше аэраторов, а в других зонах — меньше, чем требуется, приведет к необходимости подачи в аэротенк большего расхода воздуха, чем это было бы возможно при правильной схеме расположения аэраторов. Для разработки такой схемы можно рекомендовать получение и последующую математическую обработку экспериментальных данных по скорости потребления иловой смесью кислорода при окислении загрязнений конкретной сточной воды.

Эффективность использования кислорода подаваемого воздуха выше при равномерной раскладке аэраторов по днищу.

Проверенным приемом повышения энергоэффективности является совместное использо-

вание аэрационных систем и мешалок. Формирование в коридоре аэротенка продольных потоков увеличивает путь пузырьков воздуха к поверхности и пропорционально повышает растворимость кислорода.

При использовании механических мешалок для перемешивания неаэрируемых зон в аэротенках также возможна существенная экономия энергии. При использовании «карусельных» схем перемешивания, экономия энергозатрат (в сравнении с перемешиванием в отдельных коридорах) составляет до 1,5–2 раз. Особенно популярна «карусельная» схема при реализации процесса нитри-денитрификации. В этом случае она также обеспечивает внутреннюю рециркуляцию нитратов из аэробной зоны в аноксидную. Как было сказано выше, наличие горизонтального потока повышает эффективность использования кислорода воздуха. «Кarusельное» перемешивание может быть использовано и в анаэробных зонах аэротенка в технологии биологического удаления азота и фосфора.

Наряду с решением задачи энергоэффективности, специалистам необходимо учитывать технологические аспекты, поскольку реактор-смеситель, формируемый при «карусельном» перемешивании, не всегда оптимален для процесса.

Если в проекте реализованы «закрытые» коридоры, также возможно оптимизировать энергопотребление для перемешивания. При этом следует избегать узких длинных коридоров. Вне зависимости от мощности мешалка сможет перемешать зону, длина которой не более чем в 2,5 раза превышает ширину коридора. Кроме того, хорошо зарекомендовало себя использование низкооборотных мешалок (30–45 об/мин) с большими лопастями, обеспечивающих такую же эффективность перемешивания, что и высокооборотные при 3–5-кратном снижении энергопотребления.

В целях экономии капитальных вложений (особенно при частичной реконструкции очистных сооружений) возможно, с некоторым снижением скорости процесса денитрификации, использовать перемешивание воздухом через дырчатые трубы либо специальные аэраторы. Для этого не требуется дополнительное электро-механическое оборудование, но во многих случаях энергопотребление на перемешивание этих зон повышается до 8–10 раз. Фактическая реализация этого преимущества тесно связана с производительностью воздуходувок и возможностью регулирования их производительности.

Существенные возможности для экономии электроэнергии также имеются при реализа-

ции рециклов иловой смеси и возвратного ила. Безусловно, не следует использовать (кроме небольших сооружений) рециркуляцию возвратного ила эрлифтами, а применять насосы. Для внутренней рециркуляции иловой смеси в аэротенке (по технологии удаления азота и фосфора) целесообразно использовать горизонтальные («в трубе») погружные насосы. Однако эти агрегаты имеют весьма высокую производительность, ограничивающую возможность их применения достаточно крупными установками.

На энергопотребление воздуходувок также может влиять оборудование для измерения расхода подаваемого ими воздуха. В основе традиционных расходомеров воздуха лежит измерение дифманометром потери давления в трубопроводе в результате прохождения потоком местного сопротивления (диафрагмы). Эти потери могут составлять около 5% общего давления, развиваемого воздуходувками. Альтернативой могут быть приборы на основе трубки Пито, позволяющие получить точное измерение расхода практически без потерь давления.

Существенное энергосбережение может быть получено при использовании ленточных фильтр-прессов, которые при обезвоживании осадка потребляют в несколько раз меньше электроэнергии, чем центрифуги. Однако, выбор аппаратов обезвоживания, безусловно, не ограничивается фактором энергопотребления. Центрифуги гораздо компактнее и полностью закрыты, что объясняет их большую популярность в отрасли.

Регулирование работы сооружений и оборудования

Поступление сточных вод на сооружения биологической очистки, как известно, подвержена сезонной, недельной и суточной цикличности. Первые две описываются суточным коэффициентом неравномерности, третья — часовым коэффициентом неравномерности. Однако менее известно, что поступление загрязняющих веществ также характеризуется неравномерностью, причем аналогичной расходу по времени суток (рис. 1). Это объясняется тем, что в жилом секторе водопотребление происходит одновременно с хозяйственно-фекальным загрязнением воды. В ночной период водопотребление в основном формируется утечками, которые не сопровождаются загрязнением. Причем в последние десятилетия объемы утечек существенно сократились в связи с переходом на использование более надежных бытовых санитарно-технических приборов и смесителей.

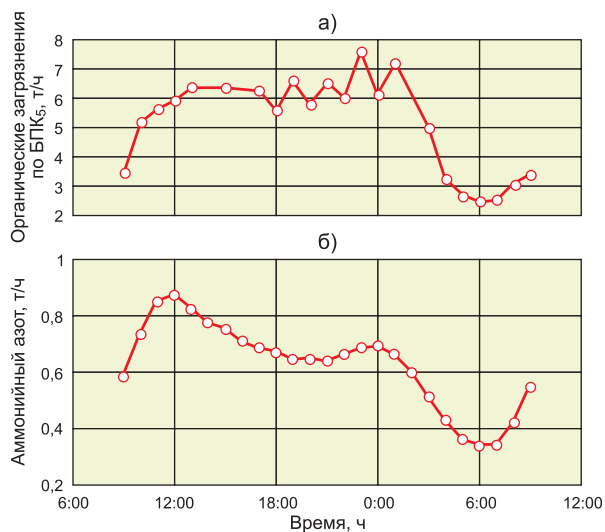


Рис. 1. Динамика поступления загрязнений (в рабочие дни) на старый блок Курьяновских очистных сооружений Москвы
 а – BPK₅; б – N-NH₄

Таким образом, массовая нагрузка на очистные сооружения, представляющая собой произведение объемной нагрузки и концентрации загрязнений, подвержена более существенной неравномерности (рис. 1).

Соотношение средней нагрузки по кислородопотребляющим загрязнениям ($BPK_{полн} + 4,57N-NH_4$) за 6 часов минимальной нагрузкой к средней за сутки составляет 0,55 (что соответствует $K_{нпр}$ 1,8). Отношение минимальной нагрузки к максимальной (также за 6 часов) составляет около 0,45. Последнее соотношение показывает необходимую минимальную глубину регулирования расхода воздуха. С учетом некоторой неравномерности и внутри 6-часового диапазона глубина регулирования должна составлять до 40% максимальной подачи.

На действующих очистных сооружениях при отсутствии регулирования подачи воздуха это явление формирует чрезвычайно переменчивую картину качества очищенной воды. Так, на Курьяновских очистных сооружениях г. Москвы измерение (в режиме on-line) концентрации аммонийного азота в иловой смеси (как критерия достаточности подачи воздуха в сооружение) показало, что она непрерывно изменялась в диапазоне от 1 до 20 мг/л (при среднем значении 7 мг/л) по кривой, аналогичной показанной на рис. 1, б. Столь высокая неравномерность потребности аэротенков в кислороде создает очень большой резерв для экономии энергоресурсов за счет обеспечения подачи в аэротенк того количества воздуха, которое необходимо для технологического процесса. Потребность в воздухе, как правило, определяется по концентрации

растворенного кислорода, измеряемой кислородомерами, располагаемыми в индикативных точках. Значительно реже (для симультанной нитри-денитрификации) применялись приборы, напрямую измеряющие интенсивность биохимических процессов, однако они не получили широкого распространения из-за высокой стоимости и сложности.

Если для традиционной биологической очистки отсутствие регулирования приводит только к избыточному потреблению энергоресурсов, то при использовании аноксидных и анаэробных процессов при биологическом удалении азота и фосфора – и к снижению технологической эффективности.

Справедливости ради следует отметить, что для нагруженных по проекту аэротенков резерв снижения энергопотребления несколько меньше, чем можно предположить, анализируя рис. 1, так как отечественная практика проектирования не достаточно учитывала суточную неравномерность поступления загрязнений, создавая тем самым периоды, когда подача воздуха недостаточна и концентрация растворенного кислорода в сооружениях снижается ниже допустимой.

Условия для регулирования расхода воздуха, подаваемого в аэротенки, существенно отличаются от регулирования расхода жидкости, перекачиваемой насосами. Как правило, при перекачке жидкости большая часть напора, развиваемого насосом, расходуется на потери по длине трубопровода (динамическая составляющая). Поэтому для этой ситуации успешно применяется регулирование частоты тока (либо частоты вращения вала насоса), приводящее применительно к центробежным агрегатам к снижению как расхода, так и напора, что позволяет обеспечить перекачку необходимого количества жидкости.

Напротив, регулирование воздуходувок должно осуществляться при сохранении постоянного напора, так как динамическая составляющая потерь напора не превышает 15% общего необходимого давления, а остальное приходится на статическую составляющую. Поэтому регулирование расхода центробежных воздуходувок с помощью изменения частоты вращения вала не применимо.

Частые остановки и включения высоковольтных воздуходувок весьма нежелательны, поэтому регулирование подачи воздуха в аэротенки требует использования другого оборудования. Возможны следующие варианты:

нагнетатели объемного действия (например, роторно-кулачкового типа) с преобразователями

частоты тока. Объемные машины при снижении частоты вращения вала обеспечивают постоянный напор. Однако КПД этих агрегатов существенно уступает центробежным;

низковольтные воздуходувки, включаемые и выключаемые без особых ограничений. Недостатком такого решения является заведомо увеличенное количество единиц оборудования, необходимое для процесса регулирования;

центробежные воздуходувки, оборудованные специальным регулируемым направляющим аппаратом на входе. Изменение угла наклона расположенных в этом аппарате лопаток приводит к созданию на входе в воздуходувку воздушного кольца, существенно (до 2,5 раз) снижающего расход воздуха (и, как следствие, электроэнергию) при сохранении давления и относительно небольшого (в пределах 5–7%) снижения КПД. Такие агрегаты пока редко используются в России. Две воздуходувки производительностью 750 м³/мин с 2006 г. работают на новом блоке Люберецких очистных сооружений Москвы, обеспечивая регулирование расхода до 40% номинала.

На практике неоднократно подтверждена возможность регулирования стандартных центробежных отечественных воздуходувок дросселированием входящего потока, но во избежание помпажа глубина регулирования при этом в несколько раз ниже, чем при использовании вышеописанных агрегатов.

Другие технологические потоки, которые целесообразно регулировать – рециклы возвратного ила и иловой смеси. Для внутренних рециклов используют регуляторы частоты тока. Для рецикла возвратного ила гидравлическая ситуация во многих случаях аналогична воздуходувкам – большая часть напора расходуется на преодоление разницы в отметках. В этой ситуации следует использовать несколько насосов.

Наряду с регулированием суточного цикла нагрузки большое значение для энергосбережения имеет равномерное распределение потоков сточных вод, ила и воздуха по аэротенкам. В условиях отсутствия расходомеров на воздуховодах на отдельные аэротенки и коридоры выравнивание расходов воздуха может быть выполнено (после выравнивания расходов воды) с помощью переносного кислородомера. Такая работа позволит повысить эффективность использования воздуха, устранив недостаток или избыток кислорода в отдельных коридорах и аэротенках. Безусловно, такое регулирование необходимо повторять после изменений конфигурации работы сооружений (вывод из работы линий).

Большое значение имеет метод определения достаточности аэрации, т. е. определения концентрации растворенного кислорода в иловой смеси в аэротенках. Традиционно используемый химический метод определения по Винклеру дает завышение концентрации растворенного кислорода приблизительно на 1 мг/л [1]. Это должно учитываться при переходе на более простой и удобный приборный потенциометрический способ измерения. Полученная при измерении прибором концентрация растворенного кислорода 1 мг/л соответствует 2 мг/л при определении по Винклеру, т. е. достаточна для процесса полной биологической очистки. Если не учитывать это обстоятельство, можно существенно завысить подачу воздуха в аэротенки.

Возможности для энергогенерации на коммунальных очистных сооружениях

Процессы очистки сточных вод позволяют не только потреблять, но и вырабатывать возобновляемую электрическую и тепловую энергию. Это основано на том, что в процессе использования происходит значительное увеличение изначально практически нулевого энергopotенциала поданной потребителю водопроводной воды: повышаются температура и химическая энергия жидкости в результате попадания в нее загрязняющих веществ.

Очевидно, что практически вся энергия, идущая на подогрев горячей воды, попадает в сточные воды. Поток тепловой энергии, поступающей в сточные воды расходом 100 тыс. м³, при удельной норме водопотребления 250 л/(сут·чел) оценивается в 4 тыс. Гкал/сут (195 МВт). Хотя на очистные сооружения поступает не более 30% этого теплового потока (около 1,2 тыс. Гкал/сут, 58 МВт), это обеспечивает температуру сточных вод, которая в России (в крупных городах) даже в сильные морозы не опускается ниже 16 °С, что на несколько градусов выше, чем в более мягких климатических условиях Западной Европы. Следует обратить внимание, что, несмотря на существенное снижение водопотребления в российских населенных пунктах, происходящее в последние два десятилетия, это свойство сточных вод остается неизменным.

Таким образом, сточные воды представляют собой один из лучших источников тепловой энергии для применения тепловых насосов – теплотехнических установок, позволяющих с помощью низкокипящего хладагента отбирать теплоту низкого потенциала практически из любого источника (грунтовые воды, воздух и т. д.) и превращать ее в более высокопотенциальное

тепло, пригодное для отопления. Этот процесс требует потребления электричества для работы компрессора хладагента. Выигрыш в энергии, т. е. эффективность тепловых насосов принято характеризовать величиной коэффициента трансформации энергии $K_{тр}$. Тепловые насосы на сточных водах, имеющих температуру 16–22 °С, способны вырабатывать горячую воду с температурой около 55 °С при $K_{тр}$, равном 3,5–4.

Тепловые насосы широко используются во многих странах. В Швеции, например, их применяют для обогрева 70% жилых зданий. В России внедрение этого оборудования (не только на сточных водах, но и на любых источниках низкопотенциального тепла), только начинается. В МГУП «Мосводоканал» на канализационной насосной станции «Северное Бутово» с 2006 г. работает тепловой насос мощностью 0,035 МВт, что позволило отказаться от центрального отопления здания [2]. Таким образом, получен успешный опыт работы теплового насоса на необработанной сточной воде, что, безусловно, сложнее с технической точки зрения из-за опасности забивания и зарастания поверхности теплообменников.

Экономический эффект от применения тепловых насосов определяется соотношением стоимости электрической и тепловой энергии (для данного объекта), а также стоимостью самого оборудования и его установки [3]. Безусловно, наибольший выигрыш получается при отоплении объектов (насосных станций и др.), не подключенных к централизованной системе, для которых использовался электрообогрев. В этом случае экономический эффект (в %) будет близок к энергетическому. Таким эффектом успешно пользуются для отопления (при положительных температурах) в помещениях, где установлены кондиционеры с функцией отопления, работающей на том же техническом принципе.

Безусловно, оптимальным местом для установки тепловых насосов является поток очищенной воды. До прохождения биологической очистки существенное снижение температуры сточной воды зимой недопустимо, так как повлечет за собой ухудшение качества очистки от аммонийного азота. В очищенной воде, в особенности после прохождения дополнительного процеживания, можно разместить теплообменники с большей удельной площадью и теплоъемом, чем в исходной сточной воде.

Ресурсы выработки горячей воды на очистных сооружениях огромны. Тепловые насосы могут позволить экономически эффективно извлекать из рассматриваемого потока в 100 тыс. м³/сут

сточных вод до 15 МВт тепловой мощности. Однако для работы тепловых насосов необходимо задействовать электрическую мощность около 4,5 МВт, т. е. превышающую все базовое энергопотребление анализируемого в расчетах предприятия ВКХ. Учитывая, что соотношение затрат энергии на отопление и горячее водоснабжение жилых домов в российских условиях составляет (3–4):1, рекуперированная энергия может полностью обеспечить потребности в тепле около 2,5% потребителей, т. е. прилегающие к очистным сооружениям районы. В таких масштабах использование тепловых насосов в канализации может стать наиболее актуальным направлением повышения энергоэффективности ВКХ. Однако практическая реализация этого решения в условиях сложившихся систем теплоснабжения представляет собой сложную инженерную и организационную задачу. Поэтому первоочередным направлением использования теплоты сточных вод должен стать перевод на отопление тепловыми насосами самих очистных сооружений.

В некоторых случаях сбросы очищенной воды могут использоваться для выработки электроэнергии. Например, в 2006 г. введена в эксплуатацию микрогидроэлектростанция мощностью 1,2 МВт на выпуске правобережных городских очистных сооружений МУП «Ульяновскводоканал» (город известен своим сложным рельефом). Ведутся аналогичные разработки в Барнаульском, Волгоградском и Камышинском Водоканалах.

Органические загрязнения, поступающие в сточные воды, формируют их химический энергетический потенциал. При обычной для России загрязненности городских сточных вод 400 мг/л по ХПК тепловая энергия массы загрязняющих веществ, содержащихся в ежедневно образующихся 100 тыс. м³ сточных вод, составляет около 104 Гкал (по низшей теплоте сгорания), что эквивалентно потенциальной мощности около 5000 кВт. Таким образом, поток суммарной тепловой и химической энергии на входе на очистные сооружения составляет около 63 МВт, что более чем в 15 раз превышает общую электрическую мощность, потребляемую самой системой ВКХ.

Несмотря на относительно невысокую долю химической энергии (около 10% общей) в сточных водах, ее трансформация и утилизация представляют менее сложную инженерную задачу, чем использование тепловой энергии. Однако согласно современным экологическим требованиям, часть химической энергии сточных вод неизбежно потеряна в ходе экзотермической

реакции денитрификации, в которой используется органическое вещество загрязнений. Кроме того, даже при рациональном ведении процесса биологической очистки в аэротенках неизбежно окисление кислородом некоторой части органических загрязнений, что не только приводит к потере части энергопотенциала, но и требует потребления энергии на подачу воздуха.

В результате очистки городских сточных вод часть энергии химических связей выделяется в ходе экзотермических реакций окисления органических веществ, а остальная — концентрируется в осадках. В результате очистки 100 тыс. м³/сут сточных вод образуется около 20 т сухого вещества осадка (смеси осадка первичных отстойников и избыточного активного ила). При удельной низшей теплоте сгорания этого осадка около 4000 ккал/кг сухого вещества потенциальная энергетическая мощность этого потока вещества составляет около 3800 кВт. Таким образом, в процессе очистки сточных вод до 75% их химической энергии может быть сконцентрировано в осадках.

Часть этой энергии может быть трансформирована в процессе анаэробного сбраживания в метантенках с получением энергетического сырья — биогаза. Этот процесс характеризуется практически 100-процентной трансформацией энергии биоразлагаемого в данных условиях органического вещества осадка, так как сам биохимический процесс сбраживания практически не сопровождается потерями на прирост биомассы и не связан с окислением. В процессе метанового сбраживания до 50% химической энергии осадка (эквивалентно мощности 1,9 МВт) переходит в биогаз. Однако проведение сбраживания требует затрат тепловой энергии для подогрева метантенков, которые особенно велики для более распространенного в России термофильного процесса (53 °С). Необходимая тепловая мощность на их обогрев в рассматриваемом примере составляет около 0,75–1,1 МВт (т. е. с учетом КПД теплоустановки на обогрев уходит не менее 45–70% получаемой в виде биогаза энергии). Таким образом, энергетическая эффективность термофильного процесса не превышает 55%. Эта величина может быть существенно увеличена при использовании теплообменников, которые позволяют сократить затраты на обогрев примерно вдвое, либо при осуществлении мезофильного процесса сбраживания (37 °С).

Ситуация с работой метантенков в российских Водоканалах до настоящего времени остается более чем неудовлетворительной. Из имеющихся в общей сложности около 400 метантен-

ков эксплуатируется не более 25% (в том числе в Москве свыше 40 единиц). Кроме того, далеко не на всех станциях, где работают метантенки, образующийся при сбраживании биогаз утилизируется. В мировой практике применяются несколько способов утилизации энергии биогаза:

традиционный для России — в котельной. В стране давно разработаны и успешно применяются двухтопливные котлы, позволяющие сделать работу котельной более гибкой. По получаемой величине КПД (около 85%) — это вполне приемлемый метод. За рубежом он практически не находит применения прежде всего из-за значительно меньшей потребности мезофильных метантенков в тепле для обогрева;

традиционный для Западной Европы — когенерация (выработка электроэнергии и тепла в мини-ТЭС). При этом, как правило, используются двигатели внутреннего сгорания. Мини-ТЭС имеют электрический КПД около 45%, т. е. позволяют перевести в электроэнергию до 0,85 МВт энергии (для рассматриваемого в расчетах потока сточных вод). По такому принципу с начала 2009 г. на Курьяновских очистных сооружениях Москвы работает мини-теплоэлектростанция электрической мощностью 10 МВт и тепловой — 8 МВт, обеспечивающая очистные сооружения электроэнергией на 40–50% от их общей потребности [4]. При большой производительности могут применяться газовые турбины (но у них меньше электрический КПД);

компримирование и использование в качестве высокооктанового и экологически чистого моторного топлива. Находит все большее применение, прежде всего в Северной Европе, где на биометан переводят автомашины, работающие в городском хозяйстве. Этот и предыдущий метод требует очистки биогаза от примесей. При использовании в качестве автомобильного топлива эффективно также отделение СО₂, который также утилизируется;

когенерация с утилизацией вырабатываемого высокопотенциального тепла для сушки части образующегося осадка. Такая схема реализуется, в частности, на других крупнейших очистных сооружениях Москвы — Люберецких. Электрическая мощность также составит 10,8 МВт;

использование в качестве топлива для сушки осадка. При использовании контактных (непрямых) сушилок энергия выпаренной воды может быть возвращена при ее конденсации. Полученная при этом горячая вода обеспечивает обогрев метантенков. Такая схема используется, например, на очистных сооружениях Штутгарта (Германия). Высушенный осадок, в свою очередь,

может утилизироваться как топливо на ТЭС либо как сырье и топливо – на цементных заводах; прямой привод воздухоподогревателей от газовых двигателей. Такой способ существенно повышает общий КПД системы, но существенно менее гибок, поэтому используется редко.

Поскольку процесс сбраживания осадка играет ключевую роль в оптимизации энергобаланса очистных сооружений, весьма важны инженерные и технологические мероприятия по повышению его эффективности. Наиболее важные из них:

обеспечение надлежащего сгущения осадков перед сбраживанием (с содержанием сухого вещества не менее 5%);

использование теплообменников для рекуперации тепла;

надлежащее перемешивание осадка в метантенках. Положительный опыт реконструкции метантенков с установкой энергоэффективных мешалок накоплен на московских очистных сооружениях [5];

двухстадийное (термофильно-мезофильное) сбраживание;

использование различных видов предварительной обработки осадка (тепловая обработка, УФ-облучение) для увеличения выхода биогаза. Это направление пока относится к экспериментальным.

Полную утилизацию химической энергии осадка может обеспечить их сжигание с выработкой электроэнергии и утилизацией получаемого тепла – на очистных сооружениях либо с

вывозом на ТЭС (как правило, после сушки). При сжигании неизбежны потери энергии (чем меньше теплотворная способность топлива, тем больше потери). Поэтому важным технологическим элементом схем со сжиганием осадка является его предварительная термическая сушка, тепло на которую подается от стадии сжигания.

В настоящее время открытым остается вопрос – какой из двух методов трансформации энергетического химического потенциала осадка сточных вод (либо их сочетание) является оптимальным с экономической точки зрения. Для ответа на этот вопрос для российских условий требуется проведение технико-экономических расчетов по вариантам технологий для сооружений различного масштаба. Очевидно, что экономическая оценка энергетической утилизации осадка в значительной степени зависит от стоимости более традиционной неэнергетической его утилизации (размещения).

Массовые и тепловые балансы, возникающие при реализации вышеупомянутых схем, весьма сложны и не могут быть проанализированы в рамках данной статьи. Следует отметить, что для очистных сооружений средней производительности метановое сбраживание является наиболее доступным методом утилизации энергии загрязнений сточных вод.

В настоящее время ведущие российские Водоканалы идут различными из вышеописанных путей. В Санкт-Петербурге успешно реализуется сжигание почти всех образующихся сырых осадков [6]. По такому же пути идет Водоканал

Таблица 1

Сооружение/процесс	Вариант 1	Вариант 2
Первичные отстойники	Не используются	$\mathcal{E}_{\text{вв}} = 60\%$, $\mathcal{E}_{\text{БПК}} = 35\%$ (вв – взвешенные вещества)
Аэротенки с нитри-денитрификацией	Коридорные	«Карусельные»
Перемешивание в зоне денитрификации	Высокооборотными мешалками	Низкооборотными мешалками
Аэрационная система	Средняя эффективность 3,3% на 1 м глубины аэротенка	Повышенная эффективность 4,3% на 1 м глубины аэротенка с учетом совместной работы с мешалками
Внутренний рецикл денитрификации	Эрлифтом	Горизонтальным погружным насосом «в трубе»
Регулирование подачи воздуха в аэротенки	Отсутствует	По концентрации растворенного кислорода регулируемые центробежными воздуходувками
Перекачка возвратного ила из вторичных отстойников	Насосом «сухой» установки	Вертикальным погружным насосом «в трубе»
Механическое сгущение ила	Не используется	На ленточных сгустителях
Стабилизация ила	Аэробные стабилизаторы (на 20% распада беззольного вещества)	Анаэробное сбраживание в метантенках в мезофильных условиях (распад беззольного вещества 42%), перемешивание центральными мешалками
Утилизация биогаза	–	В мини-ТЭС, получаемое тепло полностью обогревает метантенки, электроэнергия используется для работы воздуходувок
Обезвоживание осадка	В центрифугах	На ленточных фильтр-прессах

Таблица 2

Сооружение/процесс	Потребляемая мощность, кВт (со знаком минус – энергогенерация)	
	вариант 1	вариант 2
Подача воздуха в аэротенки	1090	490
Подача воздуха в аэробный стабилизатор	130	–
Перемешивание зон денитрификации	40	10
Рецикл возвратного ила	35	25
Рецикл денитрификации	150	15
УФ-обеззараживание	180	180
Сгустители ила	–	15
Метантенки	–	20
Мини-ТЭС (выработка энергии)	–	– 600
Мини-ТЭС (потребление)	–	20
Обезвоживание осадка	70	20
Прочие производственные потребности (вентиляция и т. п.)*	50	50
Освещение производственных помещений и территорий*	20	20
Всего	1765	265

*Данные потребности взяты ориентировочно и приняты равными для обоих вариантов (хотя также существуют большие возможности для энергосбережения).

Ростова-на-Дону. На Курьяновских и Люберецких очистных сооружениях Москвы планируется сочетание метанового сбраживания и последующего сжигания осадка.

Обобщим некоторые из проанализированных путей энергосбережения и энергогенерации на конкретном примере. Рассмотрим два варианта очистных сооружений производительностью 100 тыс. м³/сут (табл. 1):

первый – упрощенная современная технология, не ориентированная на энергосбережение;

второй – технология, направленная на оптимизацию энергобаланса.

Результаты укрупненных расчетов потребления и производства энергии по обеим станциям приведены в табл. 2. Из этих данных видна огромная разница между рассмотренными вариантами проектов – более чем в 6,5 раз! Причем собственно энергопотребление (за вычетом генерации) в энергооптимальном варианте меньше в 2 раза. На рис. 2 схематически показаны основные потоки энергии в одном из энергетически оптимальных вариантов системы водоотведения и очистки сточных вод [7].

Выводы

Проведенный анализ путей энергосбережения и энергогенерации в водопроводно-канализационном хозяйстве показывает, что в зависимо-

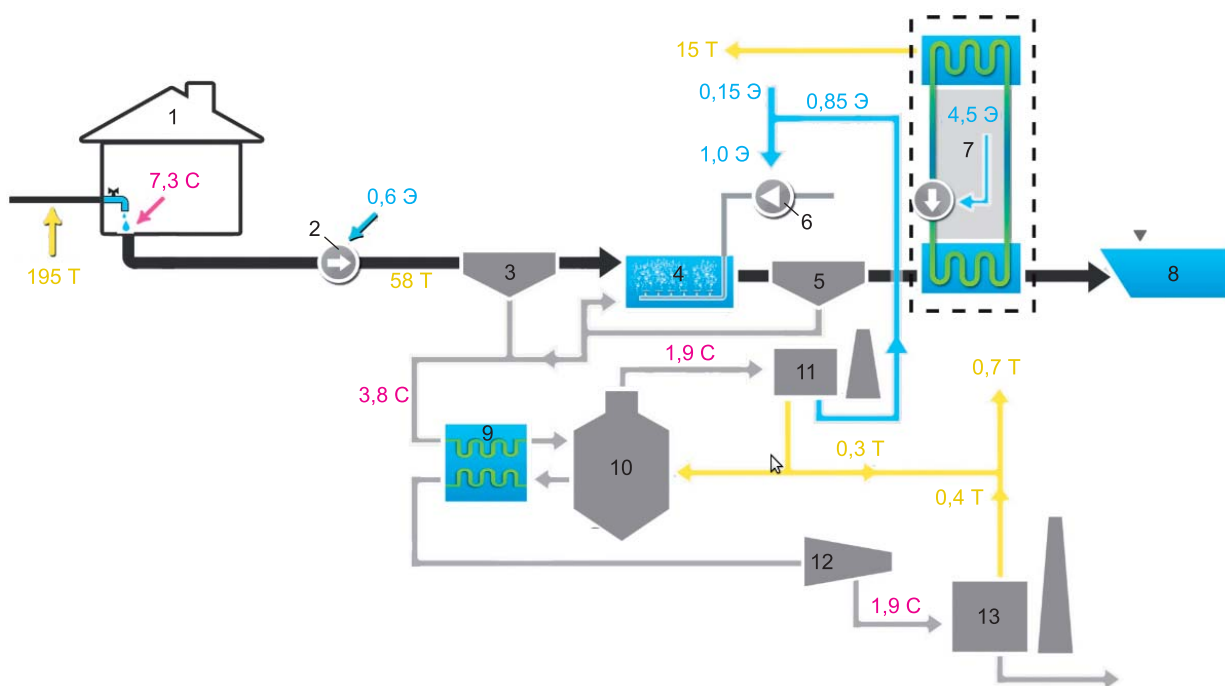


Рис. 2. Энергоэффективная схема водоотведения (пример)

1 – абоненты; 2 – КНС; 3 – первичные отстойники; 4 – аэротенки; 5 – вторичные отстойники; 6 – воздуходувки; 7 – тепловой насос; 8 – водоприемник; 9 – теплообменники; 10 – метантенки; 11 – мини-ТЭС на биогазе; 12 – обезвоживание; 13 – установка сжигания осадка; потоки энергии, МВт: С – химической; Т – тепловой; Э – электрической

сти от применяемых технических решений общий энергетический баланс может различаться (применительно к расходу сточных вод 100 тыс. м³/сут) от чистого потребления 4 МВт электрической мощности до производства 7,5–8 МВт (за счет выработки до 16 МВт, в том числе до 1 МВт электроэнергии). Сооружения очистки городских сточных вод в зависимости от выбранных технических решений могут различаться по энергопотреблению более чем в 6 раз.

Экономическая эффективность большинства изложенных мероприятий требует расчетного подтверждения для местных условий, прежде всего соотношения стоимостей электрической и тепловой энергии (топлива). Однако очевидно, что вторичные возобновляемые энергоресурсы (прежде всего тепловая энергия), потенциально доступные в ВКХ, весьма велики. Реализация наиболее эффективных с энергетической точки зрения технологий без преувеличения позволяет перевести водопроводно-канализационное хозяйство, являющееся одним из наиболее энергоемких секторов экономики, на энергетическое самообеспечение (при приведении к единому балансу энергии).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храменков С. В., Пахомов А. Н., Данилович Д. А. Развитие московской канализации. – М.: Можайск-Терра, 2003.
2. Битиев А. В. Пути повышения энергоэффективности на объектах городского хозяйства на примере МГУП «Мосводоканал» // Энергосбережение. 2008. № 7.
3. Карпов Н. В., Шварц В. М., Елистратов С. Л., Бивалькевич А. И. Технико-экономическое обоснование применения тепловых насосов для теплоснабжения водохозяйственных объектов // Водоснабжение и сан. техника. 2009. № 3.
4. Хамидов М. Г., Стрельцов С. А., Данилович Д. А. Отходы на службе энергетики города // Коммунальный комплекс России. 2009. № 2 (56).
5. Храменков С. В., Пахомов А. Н., Данилович Д. А. Канализация Москвы: десять лет в новом веке. – М.: ООО «Современная полиграфия», 2008.
6. Кармазинов Ф. В., Васильев Б. В., Григорьева Ж. Л. Сжигание осадков сточных вод – решение проблемы их утилизации // Водоснабжение и сан. техника. 2008. № 9.
7. Довлатова Е. В., Данилович Д. А. Энергосбережение и альтернативная энергетика в водопроводно-канализационном хозяйстве России: состояние и перспективы: Материалы 9-го Международного конгресса «Вода: экология и технология – ЭКВАТЭК–2010». – М., ЗАО «Фирма СИБИКО Интернешнл», 2010.