

УДК 66.067: 58.071

## АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ СТОЧНЫХ ВОД ПОЛИГОНОВ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ГИДРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ

<sup>1,2</sup>Середа Т.Г.<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Пермская государственная сельскохозяйственная академия имени академика Д.Н. Прянишникова», Пермь, e-mail: stg41@mail.ru;<sup>2</sup>ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», Пермь

Предлагаются методологические и инженерно-технические подходы к очистке стоков твердых бытовых отходов (ТБО) на гидробиологических сооружениях. Целью работы являлось обоснование очистки стоков ТБО с помощью сообщества растений (в том числе естественной растительности полигонов и свалок ТБО). Показаны основные факторы, влияющие на проектные решения гидробиологических сооружений для очистки стоков ТБО. Показано, что для очистки стоков ТБО требуется очистка в трехступенчатых прудах. На первой ступени предусмотрены мелководные пруды, глубиной не более 0,5 м, для деструкции органических загрязнений с помощью сапрофитных бактерий, утилизации биогенных элементов с использованием комплекса микроводорослей и обеззараживания стоков за счет формирования пищевых цепей и удаления патогенных бактерий. На второй ступени предусмотрены глубоководные (не менее 0,5 м) пруды с высокой водной растительностью. Для трехступенчатой очистки стоков после второй ступени в составе гидробиологических сооружений предусмотрены биоканалы. Представлена методика расчета времени пребывания воды на каждой ступени очистки и площади зеркала прудов. Рассчитана гидравлическая нагрузка исходя из площади посадки гидромacroфитов и суточного расхода очищаемой воды. Для снижения показателя БПК перед сбросом стоков в поверхностные водоемы предусмотрена особая конструкция биоканалов. В статье представлены основные элементы биоканалов, известных в биомелиоративной практике. Приведена методика определения гидравлического радиуса, необходимого для расчета движения воды в каналах как по известным формулам Агроскина, Базена, так и по специальным таблицам.

**Ключевые слова:** геоботанические станции, гидробиологические сооружения, гидравлическая нагрузка, денитрификация, берма, полигоны ТБО

## ACTUAL PROBLEMS OF LEACHATE DISINFECTION OF LANDFILLS OF SOLID WASTES WITH APPLICATION OF HYDROBIOLOGICAL CLEANING

<sup>1,2</sup>Sereda T.G.<sup>1</sup>Perm State Agricultural Academy named after academician D.N. Prianishnikov, Perm, e-mail: stg41@mail.ru;<sup>2</sup>Perm National Research Polytechnic University, Perm

Methodological and engineering approaches are proposed for the purification of solid waste from hydrobiological facilities. The purpose of the work was the justification of wastewater treatment with the help of a community of plants (including natural vegetation of landfills and landfills). The main factors influencing design decisions of hydrobiological facilities for wastewater treatment of solid waste are shown. It is shown that for the treatment of solid waste MSW requires cleaning in three-stage ponds. At the first stage, shallow ponds are provided, with a depth of no more than 0.5 m for the destruction of organic contaminants with the help of saprophytic bacteria, the utilization of biogenic elements using a complex of microalgae and the disinfection of effluents through the formation of food chains, and the removal of pathogenic bacteria. The second stage provides for deep water (at least 0.5 m) ponds with a landing of aquatic vegetation. For the three-stage treatment of effluents after the second stage, biochannels are provided as part of hydrobiological facilities. The procedure for calculating the residence time of water at each stage of purification and the area of the pond mirror are presented. The hydraulic load is calculated on the basis of the area of hydromacrophytic planting and the daily flow rate of the water to be purified. To reduce the BOD before the discharge of effluents into surface water bodies, a special design of biochannels is provided. The article presents the main elements of biochannels known in biomeliorative practice. The method for determining the hydraulic radius necessary to calculate the movement of water in the channels is given, both according to the known formulas of Agroskin, Bazen, and according to special tables.

**Keywords:** geobotanical stations, hydrobiological facilities, hydraulic load, denitrification, solid, waste landfills

Актуальной проблемой является очистка сточных вод (фильтрата) полигонов твердых бытовых отходов (ТБО), рассматриваемая в работах [4, 7–9]. Известные разработки [5] позволяют использовать растительность в процессе биологической очистки фильтрата ТБО. Ранее проводились исследования по подбору растительности

на биологическом этапе рекультивации свалок и полигонов ТБО. Предлагалась также технология рециркуляции фильтрата с применением растительности [6].

Определяющими факторами для строительства гидробиотанических станций в составе гидробиологических сооружений для очистки стоков ТБО являются гидрав-

лическая производительность и нагрузка по углероду и азоту [7, 8]. Особую сложность представляет расчет времени пребывания стоков ТБО на станции и требуемой площади для них. Имеется опыт очистки хозяйственно-бытовых сточных вод гидробиотаническими методами, в которых N-NH<sub>4</sub> составляет 50 мг/л, в то время как в фильтрате ТБО концентрация аммонийного азота может достигать 900 мг/л.

Учитывая известный опыт очистки хозяйственно-бытовых стоков [1, 4] и результаты, полученные при использовании растительности (*Dactylis glomerata*) и деревьев рода *Salix* для очистки стоков ТБО, была рассчитана площадь гидробиотанических станций для очистки стоков, образующихся на полигоне малой мощности, при среднем значении выделяющегося фильтрата 15 м<sup>3</sup>/сут. и нагрузке по N-NH<sub>4</sub> – 15 кг/сут. [5]. В расчетах учитывали нагрузку по азоту, так как именно она в фильтрате особенно высока. Общая площадь ботанической станции для очистки стоков ТБО должна составлять в данном случае 5000 м<sup>2</sup>. Для того, чтобы избежать сезонных изменений гидравлической нагрузки, необходимо иметь большой резервуар-накопитель. В качестве него предложен первичный пруд-накопитель, вмещающий в себя до 30% годового объема образующегося фильтрата (в холодный (зимний) период).

Расчетами установлено [5], что объем фильтрата, необходимый для накопления в резервуаре-накопителе в период останова очистных сооружений (с ноября до апреля), на полигоне площадью 5–10 га составит 2000 м<sup>3</sup>. Глубина накопителя (пруда-усреднителя) фильтрата должна составлять не менее 1,5 м. Во избежание ситуаций, связанных с опасностью перелива фильтрата из пруда (например, во время снеготаяния или обложных дождей), рекомендуется принять глубину пруда-накопителя до 1,8 м. Гидродинамика пруда должна обеспечивать безрусловое течение сточной воды. Дно пруда должно быть выстлано глиной слоем 15–30 см с низким коэффициентом фильтрации.

Перед поступлением фильтрата [8] на гидробиологическую очистку должен быть предусмотрен фильтр для очистки от взвешенных веществ и предотвращения коррозии трубопроводов при подаче кислых стоков. В качестве фильтров можно рекомендовать сооружения, заполненные песчаными и супесчаными грунтами [2].

Для оценки требуемого времени пребывания фильтрата на гидробиотанической станции следует учитывать загрязнения по азоту и углероду в фильтрате, что предопределяет увеличение времени, рекомен-

дуемого в практике очистки хозяйственно-бытовых стоков, в 2–3 раза. К тому же на ботанических станциях фильтрата желательна периодическое подсушивание земли, увеличивающее содержание в ней кислорода и способствующее процессу денитрификации (эффект очистки от азота при такой технологии увеличивается с 25 до 90 %).

Время пребывания воды в ступенчатых прудах рассчитывали исходя из процессов самоочищения, сопровождающихся потреблением кислорода на минерализацию органических веществ и реаэрацию.

По значениям БПК<sub>полн</sub> на входе и выходе и литературным данным, по которым степень очистки на каждой ступени биологической очистки в гидробиотанических прудах принимается равной 70% от исходной БПК, определили промежуточные значения БПК<sub>полн</sub>: на выходе из первой ступени – 100, на выходе из второй ступени – 45 мг O<sub>2</sub>/дм<sup>3</sup>. По заданным величинам рассчитали время пребывания воды в ступенчатых прудах данных гидробиологических сооружений, которое составило 10–15 суток.

В технологической линии на первой ступени должны быть предусмотрены мелководные пруды с плоским дном и глубиной не более 0,5 м, с рассредоточенным выпуском и сливом воды (2–3 точки) и общим временем пребывания стоков в прудах не менее 5 суток. Главное назначение прудов на 1 ступени – деструкция органических загрязнений с помощью сапрофитных бактерий, утилизация биогенных элементов с использованием комплекса микроводорослей и обеззараживание фильтрационных вод за счет формирования пищевых цепей, в которых происходит выедание патогенных бактерий. Дополнительная аэрация в этом пруде не предусмотрена, достаточное количество кислорода обеспечивается за счет фотосинтетической деятельности микроскопических водорослей. Функционирование первого пруда начинается с наступлением вегетационного периода. Для ускорения процесса запуска пруда в него можно внести адаптированный комплекс микроводорослей (АКМ), включающий водоросли различных систематических групп.

Пруды оборудуются запасным каналом (или дополнительными ботаническими площадками) для возможности отключения прудов с целью проведения необходимых работ по посадке растений и их очистки. Во всех прудах предусматриваются рассеивающие водовыпуск и водовпуск для обеспечения движения воды по всему сечению пруда.

## Технологические параметры ступеней биологических прудов

| Показатели   | 1 ступень    | 2 ступень    | Биоканал     |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Площадь зеркала прудов $S_{\text{общ}}$ , м <sup>2</sup> (га)    | 1554 (≈ 0,2) | 230 (≈ 0,02) | 1560 (≈ 0,2) |
| Глубина, м   | 0,5          | 1,0          | 1,0          |
| Объем, м <sup>3</sup>  | 772,0        | 230          | 1560         |
| БПК <sub>полн</sub> на входе мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>  | 200          | 100          | 45           |
| БПК <sub>полн</sub> на выходе мг О <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup> | 100          | 45           | 3            |
| Средняя температура °С   | 13           | 13           | 13           |

По данным ВНИИВОДГЕО, гидрботаническая очистка стоков предприятий сложного химического комплекса может быть одинаково эффективна как в теплое, так и в холодное время года с использованием двух(трех)ступенчатой очистки «пруд – (пруд) – канал». В предлагаемой технологии каждая ступень очистки выполняет свою роль в минерализации органических веществ, содержащихся в стоках ТБО. В связи с длительным холодным периодом в условиях Урала режим гидробиологических сооружений принят сезонным (март – октябрь).

Число прудов на первой ступени гидрботанической очистки поступающих на очистку сточных вод и нормативных требований, которые определяют число ступеней не менее трех. Общая площадь зеркала пруда, в м<sup>2</sup>, была рассчитана по формуле

$$F = \frac{Q \cdot C_0 (L_0 - L_1)}{k_0 \cdot (C_0 - C) r_a} \quad (1)$$

где  $Q$  – расход сточных вод, м<sup>3</sup>/сут.;  $C_0$  – растворимость кислорода воздуха в воде, мг/л (среднее значение из таблицы растворимости кислорода для диапазона температур 10–25 °С – 8,5);  $C$  – концентрация кислорода в воде выходящей из пруда, мг/л;  $r_a$  – величина аэрации (4г/м<sup>2</sup> × сут.). Рабочую глубину пруда с естественной аэрацией определяют по формуле

$$H = \frac{k_0 \cdot r_a \cdot t (C_0 - C)}{C \cdot (L_0 - L_1)} \quad (2)$$

В технологической линии на первой ступени должны быть предусмотрены мелководные пруды с плоским дном и глубиной не более 0,5 м, с рассредоточенным выпуском и сливом воды (2–3 точки) и общим временем пребывания стоков в прудах не менее 5 суток. Пруды оборудуются байпасным каналом для возможности отключения пруда с целью проведения необходимых работ по посадке растений и очистке пруда. Площадь одного пруда составляет 500 м<sup>2</sup> из расчета, что общая площадь первой ступени гидрботанической стан-

ции около 2000 м<sup>2</sup>. В эксплуатации должны находиться не менее 3 прудов, земля в остальных трех прудах в течение определенного времени подсыхает для увеличения производительности очистки от азота. Высота слоя фильтрата на первой ступени составляла в среднем 10–20 см. Дно всех прудов должно быть выстлано глиной и выложено гравием. На второй ступени предусмотрены глубоководные (глубиной не менее 0,5 м) пруды с высадкой водной растительности. Технологические параметры ступеней биологических прудов представлены в таблице.

При заданном расходе очищаемой воды  $Q$ , заданной ширине пруда  $B$  и его глубине  $H$ , оптимальной для роста и развития растений, определяется скорость потока воды в прудах на гидробиологических сооружениях по формуле

$$v = \frac{Q}{BH} \quad (3)$$

Гидравлическая нагрузка  $N$  на ступень очистки определяется исходя из площади посадки гидромакрофитов (м<sup>2</sup>) и суточного расхода очищаемой воды (м<sup>3</sup>/сут.):

$$N = \frac{Q}{S} \quad (4)$$

Длину пруда  $L$  рассчитывали по формуле

$$L = \frac{S}{B} \quad (5)$$

Производительность ступени биохимической очистки, определяемая объемом очищенной воды в единицу времени, т.е. расходом очищаемой воды, может быть выражена через технологический показатель работы ( $k_t$ )

$$k_t = \ln \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}} \quad (6)$$

где  $C_{\text{вх}}$  – концентрация загрязняющих веществ на входе блока, мг/л;  $C_{\text{вых}}$  – то же, на выходе, мг/л;  $k$  – коэффициент скорости снижения концентрации загрязняющих веществ.

Формула (7) связывает основные технические параметры гидробиологических сооружений, значения которых необходимо определить при проектировании гидробиологических сооружений в целом.

Задание необходимой степени очистки воды на каждой ступени  $C_{\text{вх}}/C_{\text{вых}}$  при известных значениях расхода очищаемой воды  $Q$  и коэффициента скорости снижения концентрации загрязняющих веществ  $k$  позволяет определить необходимые геометрические размеры блока.

$$\frac{kLBH}{Q} = \ln \frac{C_{\text{вх}}}{C_{\text{вых}}}. \quad (7)$$

С учетом того, что стоки на выходе из биопрудов 2-й ступени имеют показатель БПК<sub>полн</sub>, превышающий допустимые значения перед сбросом стоков в поверхностные водоемы, необходима дополнительная очистка стоков. Для этого в составе гидробиологических сооружений планируется введение биоканалов, в которых будут достигаться необходимые параметры очищаемой воды.

При проектировании биоканала необходимо учитывать форму поперечного сечения, которая может быть: прямоугольной, трапециевидальной, полигональной, параболической, составной, треугольной, ложбинообразной. В классической литературе для решения задач по мелиоративной практике поперечный профиль оросительного канала включает следующие элементы:

– ширина канала по дну  $b$ . Для небольших каналов  $b$  составляет 0,2...1 м, для больших – 10 м и более. Для малых каналов ширина по дну определяется типом каналопателя;

– глубина воды в канале  $h$ . Для малых каналов  $h$  изменяется от 0,3 до 1 м, для больших – от 1 до 4 м. Глубину воды в канале с целью уменьшения фильтрации, соблюдения допустимых скоростей и меньшего отчуждения земли принимают по соотношению  $b/h = 1$ , то есть когда гидравлический радиус  $R$  близок или равен 1. При малой глубине  $h$  и соотношении  $b/h > 1$  уменьшается смоченный периметр, снижается фильтрация, но возрастают полоса отчуждения и объемы работ по устройству канала. При большой глубине  $h$  и соотношении  $b/h < 1$  уменьшается полоса отчуждения, увеличиваются скорости движения воды, а следовательно, и пропускная способность канала, но возрастает фильтрация;

– коэффициенты  $m$  и  $m_1$  характеризуют заложение мокрого и сухого откосов. Для небольших каналов  $m$  и  $m_1$  равны 1...1,5, для крупных – 1,5...3;

– бровка канала – место пересечения линии поперечного профиля канала или место

перехода горизонтальной плоскости к откосу канала. Крупные каналы, у которых профиль имеет уступы (бермы), имеют несколько бровок;

– берму, или уступ, устраивают на крупных каналах с выемкой более 5 м для придания большей устойчивости откосам. Ширина берм в зависимости от расхода канала составляет 1...1,5 м, при устройстве дороги ширину бермы увеличивают;

– общая глубина канала  $H$  зависит от глубины наполнения канала водой и остаточного напора ( $a/H = h + a$ ). Остаточный напор (запас по высоте от уровня воды до верха дамбы) для небольших каналов равен 0,15...0,25 м, для больших – 0,5...1,5 м; ширина дамбы канала поверху  $h$  для небольших каналов 0,4...1 м для крупных – 3 м и более. Ширину  $h$  принимают такой, чтобы берма была устойчивой и препятствовала проникновению воды через тело канала. На крупных каналах, особенно на затопляемых массивах, ширину дамбы устраивают с расчетом прохода автомобилей и экскаваторов, применяемых при очистке и ремонте каналов, а также перемещения передвижных насосных станций.

Живым сечением канала (потока) называется площадь поперечника канала, по которому протекает вода. Его определяют как площадь геометрической фигуры, чаще как площадь треугольника (половина произведения основания на высоту), трапеции (полусумма оснований на высоту) и т.п. Живое сечение канала может быть рассчитано с использованием величины коэффициента откосов канала. Смоченным периметром канала  $P$  называется длина линии соприкосновения воды с дном и откосами канала. Периметр смоченности канала определяет потери воды на фильтрацию из канала, сопротивление ложа движению воды и др. Значение гидравлического радиуса  $R$  (отношения площади живого сечения к периметру смоченности  $R = F/P$ ) необходимо для расчета каналов и движения воды в каналах.

Среднюю скорость движения воды в русле (канале) открытого или закрытого водовода определяют по формуле Шези:

$$v = C\sqrt{R \cdot I},$$

где  $R$  – радиус, характеризующий удельную площадь живого сечения, приходящуюся на единицу длины смоченного периметра,  $I$  – гидравлический уклон.

$$R = F / P, \quad (8)$$

где  $F$  – площадь сечения русла, м<sup>2</sup>;  $P$  – смоченный периметр, м.

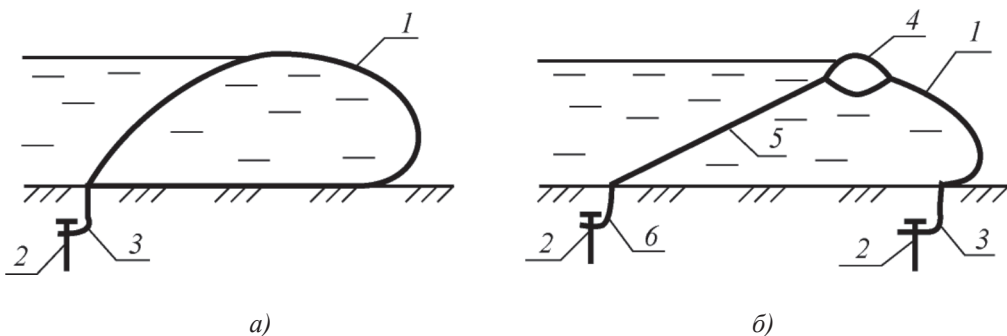


Схема тканевых плотин: 1 – оболочка плотины; 2 – анкера; 3 – заанкеренный край оболочки плотины; 4 – тканевый поплавок; 5 – тросовые оттяжки; 6 – заанкеренный конец тросовых оттяжек

Скоростной коэффициент  $C$  находят также по формулам Агроскина, Базена, по специальным таблицам и др. Скоростной коэффициент представляет функцию гидравлического радиуса и шероховатости русла  $n$ . Его значение можно определить по формуле Н.Н. Павловского.

Расход воды в канале может быть определен с помощью водосливов различной конструкции или путем непосредственного изучения скорости потока и его живого сечения. Предлагаемые в данных исследованиях биоканалы имеют отличительные признаки (в частности, низкую скорость потока, обеспечение условий для развития биоценоза и т.п.) от оросительных каналов.

Основной целью внедрения биоканала на гидробиологических сооружениях является доведение качества очищаемых стоков до ПДК для сброса их в водоёмы общего пользования. Для отработанных полигонов, где каждый теплый период скапливается сеть загрязненных стоков ТБО, можно предложить биологическую реабилитацию загрязненных стоками почв и очистку самих стоков в теплый период [3, 5].

На первом этапе работ определенным методом удаляются наиболее загрязненные слои почвы. На втором этапе:

1. Устанавливаются невысокие плотины, образующие мелководные лиманы (рисунок). Лучше использовать временные, легко-съемные, не нарушающие ландшафта мембранные плотины из тканевых материалов.

2. Лиманы заливаются водой из естественных источников.

3. Всплывшие взвешенные вещества и нефтепродукты собираются скриммером.

4. Лиманы заселяются водной растительностью.

5. В конце вегетационного периода вода спускается, плотины снимаются.

6. Отмершие и скошенные растения можно использовать, например, для получения биогаза или брикетирования и сжигания (о чем будет сказано ниже).

7. Остатки растительности (сапропель) погребут загрязненное пятно.

В качестве плотины для лимана необходимо использовать временные конструкции из тканевых наполняемых или мембранных с поплавковым поясом плотин.

#### Список литературы

1. Безднина С.Я., Овчинникова Е.В. Водоотведение в агропромышленном комплексе // Водоочистка. – 2011. – № 5. – С. 21–26.
2. Графкина М.В., Потапов А.Д. Оценка экологической безопасности строительных систем как природно-техногенных комплексов (теоретические основы) // Вестник МГСУ. – 2008. – № 1. – С. 23–28.
3. Зинов И.А., Юмагулов Н.И. Расчет многоярусной тканевой водонаполненной конструкции для очистки воды // Сб. материалов II Международной науч.-практ. конференции: Современные проблемы науки и образования в техническом вузе. – 2015. – С. 155–160.
4. Потапов А.Д., Конигин А.А. Новые возможности осветления интенсивно окрашенных фильтратов полигонов ТБО при их обезвреживании с использованием известкового молока в присутствии солей кальция // Вестник МГСУ. – 2013. – № 8. – С. 116–122.
5. Серeda Т.Г. Сервисные технологии управления полигонами твердых бытовых отходов (на примере опыта Германии). – Пермь: ООО «Полиграф Сити», 2010. – 173 с.
6. Серeda Т.Г., Костарев С.Н., Михайлова М.А. Способ очистки сточных вод рекультивированных полигонов твердых бытовых отходов // Патент на изобретение RU 2414314. 2009.
7. Сметанин В.И., Стрельников А.К. Лизиметрические исследования водного баланса применительно к свалочным грунтам полигонов твердых бытовых отходов // Природообустройство. – 2015. – № 2. – С. 21–23.
8. Сметанин В.И., Стрельников А.К., Пчёлкин В.В. Образование фильтрата на свалках и полигонах ТБО // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 25–28.
9. Riggio S., Torrijos M. Leachate flush strategies for managing volatile fatty acids accumulation in leach-bed reactors // Bioresource Technology. – 2017. 232, pp. 93–102.