

**Tartu Ülikool
Bioloogia-geograafiateaduskond
Geograafia instituut
Loodusgeograafia ja maastikuökoloogia õppetool**

Igor Zaytsev

**Сравнение комбинированных вертикально- и
горизонтальнопроточных почвенных фильтров в очистке
сточных вод в зимний период**

**Kombineeritud vertikaalvooluliste ja horisontaalvooluliste heitveepuhastus-
pinnafiltrite töö võrdlus talveperioodil**

Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal

**Juhendajad: prof. Ülo Mander
PhD Kaspar Nurk**

Tartu 2006

СОДЕРЖАНИЕ

LÜNIÜLEVAADE	4
1. ВВЕДЕНИЕ.....	5
2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОИСХОДЯЩИЕ В ИСПЫТАТЕЛЬНОМ СООРУЖЕНИИ.....	6
2.1. РАЗЛОЖЕНИЕ ОРГАНИКИ.....	6
2.2. УДАЛЕНИЕ АЗОТИСТЫХ ВЕЩЕСТВ	6
2.2.1. Нитрификация.....	7
2.2.2. Денитрификация	8
2.3. АДсорбция ФОСФОРА ИОНАМИ Fe и Al и КАТИОННЫЙ ОБМЕН	10
2.4. ПЛЕНОЧНОЕ ТЕЧЕНИЕ.....	11
2.5. ГИБРИДНЫЕ СИСТЕМЫ.....	12
3. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.....	13
3.1. ФИЛЬТРУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА.....	13
3.2. ОПИСАНИЕ ОСНОВНОГО ОЧИСТНОГО СООРУЖЕНИЯ В НЬЮ	14
3.3. ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	15
3.3.1 Вертикальный почвенный фильтр.....	16
3.3.2. Горизонтальный почвенный фильтр.....	19
3.4. ПРИНЦИП РАБОТЫ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СООРУЖЕНИЯ	20
3.5. ИСПЫТЫВАЕМЫЕ РЕЖИМЫ В ИССЛЕДУЕМОМ ОБЪЕКТЕ	21
3.6. ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ	23
3.7. АНАЛИЗ ПРОБ ВОДЫ.....	23
3.8. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ	24
3.9. СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ИХ АНАЛИЗ.....	25
4. РЕЗУЛЬТАТЫ	26
4.1. БПК ₇	26
4.2. ХПК	28
4.3. ВЗВЕШЕННЫЕ ВЕЩЕСТВА.....	31
4.4. ОБЩИЙ P	34
4.5. ОБЩИЙ N	36
4.6. NH ₄ -N.....	38
4.7. NO ₃ -N.....	40
4.8. NO ₂ -N.....	41
4.9. СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЧИСТКИ В СТОРОНАХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ СИСТЕМ ПОЧВЕННЫХ ФИЛЬТРОВ ПО ОТДЕЛЬНОСТИ.....	42
ОБЩАЯ ДИСКУССИЯ	46
ОБОБЩЕНИЕ.....	48
ÜLDKOKKUVÕTE	49
ДОПОЛНЕНИЯ	52

КРАТКИЙ ОБЗОР

Настоящая работа осуществлена в рамках проекта “Исследование комбинированных почвенных фильтров”, финансируемого Целевым Учреждением по Развитию Предпринимательства Эстонии (Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus, EAS), проект составлен и предложен Институтом Географии и Институтом Технологий Тартуского Университета.

Основные поступающие концентрированные сточные воды в очистное сооружение Нью состоят из производственной сточной воды, образующейся в результате использования воды в технологическом процессе деятельности молочного и мясного комбинатов, также бытовой сточной воды с населенного пункта Нью.

Система комбинированных почвенных фильтров состоит из двухкамерного (камеры параллельно расположены) вертикального фильтра общей площадью 8 м^2 (в качестве фильтрующих материалов используются известняковый щебень в правой стороне и легкий керамзит в левой стороне), и двухкамерного (разделенного) горизонтального фильтра общей площадью 20 м^2 (фильтрующий материал в обеих сторонах – легкий керамзит). Также изучаются режимы обратного откачивания сточной воды, применение “предварительной нитрификации”. В ходе различных испытательных циклов определяется оптимальное количество воды, откачиваемой обратно, чтоб достичь соответствующий требованиям эффект очистки.

Исследуемый промежуток времени был разбит на 2 цикла. Первый цикл длился с 9 ноября 2005 года по 28 декабря 2005 года, который впоследствии был разделен на два подцикла: 1(а) цикл (09.11.2005 г. - 30.11.2005 г.) и 1(б) цикл (07.12.2005г. - 28.12.2005г.) – в связи с заменой фильтрующего материала (блочной крошки) в вертикальном фильтре правой системы на известняковый щебень в результате изменения физико-химических свойств исследуемого материала.

Второй цикл анализировался с 30.11.2005 по 22.03.2006 года. В отличие от первого цикла, во втором цикле планово был изменен режим поступления и рециркуляции сточной воды.

В работе анализировались статистически важные изменения средних значений эффективности очистки сточной воды (%) между циклами и сторонами.

Вычислены средние значения концентраций веществ (мг/л) и их изменения в результате влияния процесса очистки.

Выявлены основные факторы, влияющие на эффективность очистки сооружения в зимний период.

Лучший эффект очистки сточной воды был достигнут во 2. цикле благодаря снижению гидравлической нагрузки: среднее значение БПК₇ в левой стороне вертикального почвенного фильтра было 65,9 %, ХПК – 56,3 %; общего азота (N) – 22,66 % среднее значение взвешенных веществ в правой стороне горизонтального почвенного фильтра было 86,9 %.

Лучшая эффективность очистки $\text{NH}_4\text{-N}$ % была со средним значением 20,7 % в 1.(б) цикле в левой стороне вертикального почвенного фильтра, в этом же цикле среднее значение для $\text{NO}_2\text{-N}$ 49 %, $\text{NO}_3\text{-N}$ 38,5 % для горизонтального левого почвенного фильтра.

Общий фосфор (P) имел сравнительно хороший показатель эффективности очистки в правой стороне горизонтального почвенного фильтра во 2 цикле зимний период, его среднее значение составляло 53,3 %.

Преимущество известнякового щебня в качестве фильтрующего материала проявилось в удалении фосфорсодержащих соединений. Легкий керамзит по своим физико-химическим свойствам проявил универсальность в удалении органики и азотсодержащих веществ.

Анализ эффективности очистки правой и левой стороной выявил преимущества левой стороны систем почвенных фильтров благодаря большей рабочей поверхности и хорошим теплоудерживающим свойствам легкого керамзита.

Lühiülevaade

Antud töö on teostatud “Kombineeritud pinnasfiltrite uurimise” projekti raames, projekti finantseerib Eesti Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus (EAS), täitjateks on Tartu Ülikooli geograafia instituut ja Tartu Ülikooli Tehnoloogiainstituut.

Nõo puhastusjaama saabuvad heitveed koosnevad põhiliselt tööstusveest, mis tekib Nõo piima- ja lihakombinaadi veekasutamise tulemusena tehnoloogilistes protsessides, samuti Nõo aleviku heitveest.

Kombineeritud pinnasfiltrite süsteem koosneb kahekambrilisest (kambrid asetsevad paralleelselt) vertikaalvoolulisest pinnasfiltrist üldpindalaga 8 m² (filtreerivate materjalidena kasutatakse lubjakivikillustikku paremal pool ja kergkruusa vasakul pool) ning kahekambrilisest (kambrid asetsevad eraldi) horisontaalvoolulisest pinnasfiltrist üldpindalaga 20 m² (filtreerivaks materjaliks on mõlemal pool kergkruus). Samuti uuritakse heitvee tagasipumpamise režiime (eelnitrikatsiooni rakendamist). Erinevate katsetsükli käigus määratakse optimaalne tagasipumbatav veehulk, selleks et saavutada nõuetele vastavat puhastusefekti.

Uuritav ajavahemik oli jagatud 2 tsükklisse, esimene tsükkel kestis 9. novembrist 2005 kuni 28. detsembrini 2005, tsükkel jagati hiljem kahte alatsükklisse: 1(a) tsükkel (09.11.2005 – 30.11.2005) ja 1(b) tsükkel (07.12.2005 – 28.12.2005) – seoses filtreeriva materjali – purustatud tuhaploki – asendamisega lubjakivikillustikuga vertikaalvoolulise pinnasfiltri paremal pool uuritava materjali füüsikalise-keemiliste omaduste muutumise tõttu.

Teise tsükli analüüs hõlmab perioodi alates 30.11.2005 kuni 22.03.2006. Teises tsükli oli esimesest tsüklist erinev heitvee vooluhulk ja retsirkuleerimise režiim.

Töös on analüüsitud tsükli ja poolte vahelisi heitvee puhastusefektiivsuste keskmiste väärtuste statistiliselt olulisi muutusi.

On välja arvatud ainekontsentratsioonide (mg/l) keskmised väärtused ja standardhälbed ning nende muutused puhastusprotsessi mõjul.

On välja selgitatud peamised seadise puhastusefektiivsusele mõjuvad faktorid talveperioodil.

Parim heitvee puhastusefektiivsus oli 2. tsükli tänu hüdraulilise koormuse vähenemisele: vertikaalvoolulise filtri vasaku poole BHT₇ keskvärtus oli 65,9 %, KHT – 56,3 %; üldlämmastiku 22,66 %, horisontaalvoolulise filtri parema poole hõljuvainete keskvärtus – 86,9 %.

Parim puhastusefektiivsus NH₄-N % oli keskvärtusega 20,7 % 1.(b) tsükli vertikaalvoolulise pinnasfiltri vasakul pool, NO₂-N 49 %, NO₃-N 38,5 % vertikaalvoolulise pinnasfiltri paremal pool

Üldfosfori puhul täheldati võrdlemisi hea puhastusefektiivsuse keskvärtus (53,3 %) horisontaalvoolulise pinnasfiltri paremal pool talveperioodil.

Lubjakivikillustiku filtreeriva materjalina kasutamine osutus efektiivseks fosfori sidumisel. Kergkruus oma füüsikalise-keemiliste omaduste poolest oli universaalne orgaaniliste ainete ja lämmastiku sisaldavate ainete eemaldamisel.

Parema ja vasaku poole puhastusefektiivsuse analüüs tõi välja pinnasfiltrisüsteemide vasaku poole eelised tänu kergkruusa suuremale eripinnale ja heale soojapidavusele.

1. Введение

Сравнительно с классическими производственными очистными сооружениями, в искусственных болотных системах не так много обслуживания и потребляющих энергию механизмов, соответственно меньше и затрат.

В отношении почвенных фильтров энергия используется в основном на направление потока воды насосами и их обслуживание.

Во всех этих действиях энергетические затраты сравнительно невелики, к тому же нет необходимости в добавлении различных химических реагентов в процессе очистки и в ежедневном обслуживании персоналом технологических процессов.

В данной работе изучается эффективность очистки сточных вод комбинированными почвенными фильтрами, а также испытание разных режимов поступления сточных вод с различными фильтрующими материалами.

Основной целью является изучение эффективности очистки сточных вод в испытательном сооружении Нью, расположенного в юго-восточной части республики Эстонии.

В работе поставлены три главные задачи:

1. влияние замены фильтрующего материала в вертикальном фильтре правого бассейна на эффективность очистки сооружения в целом;
2. изучение взаимосвязи между изменениями водного режима в двух временных циклах;
3. сравнение испытываемых материалов в почвенных фильтрах и температурного режима в зимний период.

Собранные данные анализов позволяют оценить процесс очистки и увеличить эффективность очистки в дальнейшем.

2. Основные процессы, происходящие в испытательном сооружении

2.1. Разложение органики

В условиях неподвижного состояния большие и оседающие частицы органических соединений быстро удаляются из загрязненной воды путем осаждения и фильтрации. Рост микроорганизмов справляется с удалением растворимого компонента органики. Органические образования разлагаются аэробно и анаэробно. Необходимый для аэробного разложения кислород доставляется прямо из атмосферы путем диффузии или рассеивания из макрофитных корней в ризосферу. Поглощение органических веществ макрофитами не значительно по сравнению с биологическим разложением (Watson et al. 1989; Cooper et al. 1996).

Аэробное разложение органических веществ проводится с помощью аэробной гетеротрофной бактерии согласно следующей реакции (Vymazal et al., 1998):



Автотрофные группы бактерий, которые разрушают органическое образование азота в аэробных условиях, называются нитрифицирующими бактериями, а сам процесс – аммонификацией (Cooper et al. 1996).

Недостача кислорода сильно уменьшает аэробное разложение органики. При поступлении достаточного количества кислорода вся доступная органика разрушается микроорганизмами.

Главную роль в процессе разложения органического вещества в естественных условиях играют бактерии, число которых составляет от 10^8 до 10^{14} на 1 грамм сухого вещества биомассы. Большинство бактерий имеют размеры от 0,5 до 3 мкм. По существу они выполняют роль катализаторов. Известно, что скорость роста бактерий чрезвычайно велика, спектр веществ, которые могут служить пищей для бактерий, довольно разнообразен. Они обладают чрезвычайным многообразием форм метаболизма и живут в широком диапазоне температурных изменений, содержащих O_2 и pH. Оптимальное значение pH для бактерий находится между 6,5-7,5. В бактериальной клетке содержится 80% воды и 20% сухого вещества, а также 90% сухого органического вещества и 10% неорганического. Эффективность функционирования сообщества микроорганизмов может быть оценена по степени и скорости удаления общего количества загрязняющих веществ (Вавилин и др. 1993).

2.2. Удаление азотистых веществ

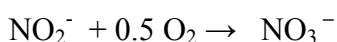
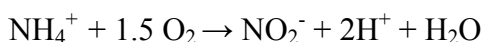
Биологический метод очистки сточных вод от азотных соединений основан на процессах нитрификации и денитрификации.

2.2.1. Нитрификация

Нитрификация представляет собой совокупность реакций биологического окисления аммонийного азота до нитритов и далее до нитратов под действием нитрифицирующих микроорганизмов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* (Мельцер 1995)

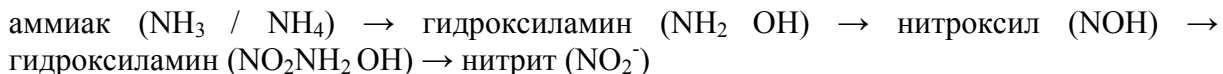
Нитрификация - это хемиоаутоототрофный процесс. Нитрифицирующая бактерия получает энергию из окисления аммиака и/или нитрита и использует диоксид углерода в качестве углеродного источника для синтеза новых клеток. Эти организмы требуют O_2 в течение срока окисления аммонийного азота до нитритного, и нитритного азота до нитратного.

Процесс окисления аммония до нитритов происходит в два этапа (Wallace, Nicholas 1969; Hauck 1984):



Первый этап - окисление аммония до нитритов - осуществляется непосредственно хемолитотрофными (аэробными) бактериями, сильно зависимыми от окисления аммиака для генерации энергии роста.

Возможная последовательность реакций окисления аммиака до нитритов для бактерий из группы *Nitroso* (Hauck 1984):



Второй этап процесса нитрификации - окисление нитритов до нитратов - проводится хемолитотрофными бактериями, которые вдобавок к нитратам также могут использовать и органические компоненты для образования энергии роста.

По сравнению с аммонийно-окислительными бактериями только один вид окисляющих нитрит бактерий обнаруживается в почве и в пресной воде - *Nitrobacter winogradskyi* (Grant, Long 1981). Однако Schmidt (1982) заявил, что кроме этой нитробактерии также найдена в почве и пресной воде разновидность из рода *Nitrospira*. Vymazal (1985) обобщил, что на нитрификацию влияет температура, значение pH, щелочность воды, источник неорганического углерода, популяция микробов, и концентрации аммонийного-N и растворенного O_2 . Оптимальная температура для нитрификации в чистых культурах от 25° до 35° C. и в почве от 30° до 40° C. Температуры ниже 15° C имеют больший эффект на нитрификацию, по сравнению с температурами между 15° и 35°. Cooper (1996) указал, что минимальные температуры для роста *Nitrosomonas* и *Nitrobacter* будут соответственно 5° и 4° C. Нитрифицирующие бактерии - организмы чувствительные, они крайне восприимчивы к широкому спектру ингибиторов, включая высокие концентрации аммонийного азота. Оптимальное значение pH для нитрификации довольно низкое (7.5-8.6), хотя в акклиматизированных системах нитрификация способна происходить и в более низких значениях pH. Для окисления 1 мг аммонийного N до нитратного N необходимо примерно 4.3 мг O_2 (Cooper et al. 1996; ref Vymazal et al. 1998).

2.2.2. Денитрификация

Денитрификация - разрушение группой почвенных и водных бактерий солей азотной кислоты (нитратов) до нитритов, молекулярного азота и аммиака, что приводит к обеднению почвы (www.Glossary.ru).

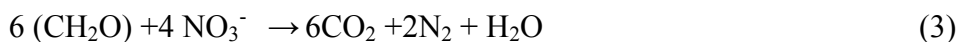
Анаэробное дыхание - энергетический процесс окисления микроорганизмами органических веществ в анаэробных условиях, при котором окислителем служит не свободный кислород, а нитраты, нитриты и сульфаты (www.Glossary.ru).

Денитрификация - окисление органических веществ при восстановлении азота нитратов до свободного азота.

Для денитрифицирующих бактерий характерной особенностью является возможность использовать источники энергии в присутствии кислорода или без него с восстановлением нитратов и образованием N₂ (Кривошеин и др. 2003).

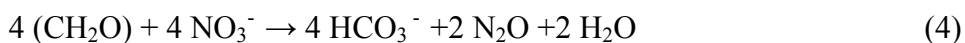
Первым без кислородным процессом окисления происходящим после кислородного истощения, является уменьшение нитратов до молекулярного N или азотсодержащих газов.

Hauck (1984) иллюстрирует денитрификацию следующим уравнением:



Эта реакция необратимая, и происходит в присутствии доступного органического субстрата только в анаэробных или без кислородных условиях ($E_h = +350$ to $+100$ mV), где N используется в качестве электронного акцептора в месте окисления. Laanbroek (1990) утверждает, что уменьшение нитратов может начаться еще перед кислородным истощением.

Продукты газообразования N в течение денитрификации можно также изобразить уравнением (Hauck 1984):



Денитрифицирующая способность в настоящий момент известна у 17 разновидностей бактерий.

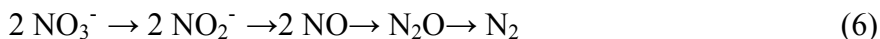
Они получают энергию путем химических реакций и используют органические соединения в качестве электронного донора и углеродного источника.

Наиболее денитрифицирующие бактерии – хемогетеротрофы – получают энергию исключительно через прямые химические реакции с использованием органических составных в качестве электронных доноров, и как источник молекулярного углерода (Hauck 1984). Самыми важными денитрифицирующими бактериями в почвенной среде представлены семейства *Bacillus*, *Micrococcus* и *Pseudomonas*, в водной среде – *Pseudomonas*, *Vibrio* и *Aeromonas* (Grant & Long 1981). Другие денитрификаторы являются членами семейств *Achromobacter*, *Aerobacter*, *Alcaligenes*, *Azospirillum* и др.

При доступном кислороде эти организмы окисляют органические соединения до CO₂ и H₂O (Reddy, Patrick 1984).

Аэробное дыхание при использовании кислорода как электронного акцептора или при использовании в той же цели азота выполняется денитрификатором по той же самой электронной транспортной системе. Эта способность функционировать как в качестве аэробного, так и анаэробного организма, имеет большое практическое значение, т.к. денитрификация становится возможной продолжаться сразу после наступления бескислородных условий (окислительно-восстановительный потенциал примерно 300 mV) без изменения в микробной популяции (Hauck 1984).

Принято считать, что фактическая последовательность биохимических изменений нитратов до элементарного газообразного азота следующая (Vymazal 1995):



Vymazal (1995) заключил, что влияющими на коэффициент денитрификации известными факторами окружающей среды являются отсутствие O_2 , окислительно-восстановительный потенциал, почвенная влага, температура, значение pH, наличие денитрификаторов, тип почвы, органическое вещество и наличие поверхностной воды. Количество N_2O , выделенного в течение денитрификации, зависит от количества денитрифицированного азота и от коэффициента, произведенного от N_2 в N_2O . На коэффициент также влияет аэрация, значение pH, температура, соотношение нитрата к аммиаку в денитрифицирующей среде.

Соопер (1996) указал, что среднее значение pH для денитрификации находится в пределах 7 и 8, однако щелочь, создаваемая в процессе денитрификации, может спровоцировать повышение кислотности. Денитрификация также строго зависит от температуры и протекает очень медленно при температурах ниже 5°C .

2.3. Адсорбция фосфора ионами Fe и Al и катионный обмен

Адсорбция – явление поглощения газов и паров, а также растворенных веществ поверхностным слоем (пористых) тел. (www.Glossary.ru)

Фосфор обычно представлен в сточных водах ортофосфатом, дегидрированным ортофосфатом (полифосфатом) и органическим фосфором. В результате биологического окисления большинство фосфора превращается в ортофосфатные формы (Соорег и др. 1996). Удаление фосфора в системе обработки почвенных фильтров происходит через адсорбцию, комплексообразование и осаждение (Watson et al. 1989). Большинство учений о заболоченных территориях показало, что осаждение / аккумуляция органики – это самое длительное по продолжительности осаждение фосфора, и болотные системы неэффективны в осаждении фосфора по сравнению с земными экосистемами (Richardson 1985).

Случается, с фосфором не происходит изменения валентности через биотическое усвоение неорганического фосфора или через разложение органического фосфора микроорганизмами. Почвенный фосфор в основном встречается в +5 (окисленном) валентном состоянии, так как другие более низкие окисленные состояния термодинамически нестабильны и легко окисляются до PO_4^{3-} даже в весьма уменьшенных искусственных болотистых почвах (Lindsay 1979).

Адсорбция и задержка фосфора в почвах болотных систем контролируется взаимодействием окислительно-восстановительного потенциала, изменением pH, Fe, Al, минералами Ca и величиной естественного почвенного фосфора (Faulkner, Richardson 1989; Richardson, Vaithiyanathan, 1995).

В кислых почвах неорганический фосфор абсорбирован в гидрооксиды Fe и Al и может осаждаться в качестве нерастворимых Fe-фосфатов (Fe-P) и Al-P. Осаждение в качестве нерастворенного Ca-P есть главная трансформация в pHs выше 7.0. (Qualls, Richardson 1995).

Адсорбция фосфора лучше в минеральных почвах нежели органических. Адсорбция фосфора неорганических почв соотносилась либо с высоким уровнем Al, Fe либо Ca, и объем сорбции фосфора в болотистых почвах может быть обусловлен исключительно содержанием выделяющего оксалат (аморфного) Al в почве (Richardson 1995). В болотных системах окислительно-восстановительный потенциал варьирует от 300 mV до 700 mV (Kadlec, Knight 1996). Окислительно-восстановительный потенциал ниже +250 mV вызовет уменьшение Fe^{3+} до Fe^{2+} , высвобождая связанный фосфор (Faulkner, Richardson 1989).

С другой стороны, уменьшение окислительно-восстановительного потенциала, вызванного искусственным затоплением, может вызвать превращение кристаллического Al и минералов Fe в аморфную форму; аморфный Al и гидрооксид Fe имеют более высокий объем сорбции фосфора, чем кристаллические окислы, благодаря их большему количеству отдельно расположенных поверхностных гидроксильных ионов (Patrick, Khalid 1974).

Faulkner и Richardson (1989) заявили, что наиболее важными удерживающими механизмами P утверждены лигандные обменные реакции (ligand exchange reactions), где фосфат перемещает воду или гидроксилы с поверхности Fe и гидрооксидов Al для образования монодентатных двоядерных образований с координационной сферой гидрооксида.

Соопер (1996) подчеркнул, что до сих пор не ясно, что является главным механизмом удаления фосфора в искусственных болотных сооружениях - специфическая адсорбция через лигандный обмен или осаждающие реакции.

Проблема максимализации, высокой эффективности длительной задержки фосфора, основана нашим недостаточным знанием эффективных путей, которые могут переместить фосфор из возможной формы в толще воды или в почвенных порах в воде в постоянное погружение, также нашей неспособностью предсказать десорбцию или освобождение фосфора из недоступных форм в растворимый фосфор в окружающей среде (Richardson et.al. 1996).

Адсорбция включает связывание частиц растворенных веществ в растворе в места на растительную или межклеточную поверхность. В реакции обмена катионов позитивно заряженные ионы металлов в растворе связываются с негативно заряженными ионами металлов, расположенными на поверхности адсорбционного материала (Tchobanoglous et al. 2003).

Притягательная сила для катионного обмена электростатична и размер этой силы зависит от широкого диапазона факторов. Катион в растворе будет вытеснять катион, связанный к месту на поверхности материала, если электростатическое притяжение этого места у растворенного катиона превышает притяжение связанного катиона. Катионно-обменная способность материала измеряется количеством связующих мест на массу или объем (Соопер et al. 1996).

2.4. Пленочное течение.

Толщина образующейся биопленки зависит от гидравлической нагрузки, концентрации органических веществ, от пористости и удельной поверхности загрузочного материала, влияния внешней среды и многих других факторов.

С увеличением крупности фракций загрузочного материала уменьшается площадь рабочей поверхности для образования биопленки. Поэтому для повышения пропускной способности биофильтров следует идти по пути увеличения пористости загрузки (Кедров и др. 2002)

Величина слоя биопленки оказывает влияние на условия равновесия вне биофильтра и внутри его при диффузионных потоках кислорода и углекислого газа. Поэтому при достаточно большом слое биопленки может наступить момент, когда потребление кислорода биопленкой прекратится. В этом случае в теле биофильтров могут начаться процессы гниения, опасность такого явления в наибольшей степени возникает в данных биофильтрах. Во избежание этого необходимо регулировать скорость потока, чтобы обеспечить пленочное течение жидкости и отсутствие мертвых зон (Яковлев, Воронов 2004).

2.5. Гибридные системы.

Гибридными системами называют комбинированные друг с другом почвенные фильтры вертикального и горизонтального потока.

Общая цель создания гибридных систем – использовать преимущества, компенсировать недостатки того или иного типа почвенного фильтра (Noorvee 2003)

В основном представлены два вида гибридных систем: горизонтальный почвенный фильтр и вертикальный почвенный фильтр, расположенный спереди. Перед почвенными фильтрами иногда размещают свободные болотные системы (без присутствия высших водно-растительных групп), которые часто применяют и описывают в исследовательских работах в Германии.

Соорег (1999) упоминает, что полезно разместить перед вертикальным почвенным фильтром септик, его задачей было бы уменьшение содержания взвешенных веществ в концентрированной сточной воде и защита вертикального почвенного фильтра от затора.

Этот же автор приводит целесообразность размещения вертикального почвенного фильтра в данных гибридных системах впереди в первом этапе, горизонтального почвенного фильтра во втором этапе, что обеспечивает оксидацию органических веществ, а также нитрификацию.

На основе рекомендаций Соорег'а (1999) и примеров водно-очистных сооружений в Кодиярве и Кыю было спроектировано и введено в эксплуатацию испытательное очистное сооружение в Нью.

3. Материалы и методы

Для оценки влияния происходящих процессов очистки в очистном сооружении использовали данные очистного сооружения Нью. Прежде всего анализированы процессы, которые связаны с уровнем кислородного равновесия в очистке (разложение органики, нитрификация, денитрификация), а также проблемы удаления фосфорсодержащих соединений (адсорбция фосфора).

Данные анализов собраны в рамках проекта “Исследование комбинированных почвенных фильтров”, финансируемого целевым учреждением по развитию предпринимательства Эстонии (Ettevõtluse Arendamise Sihtasutus, EAS), который составлен и предложен Институтом Географии и Институтом Технологий Тартуского Университета.

3.1. Фильтрующие материалы и их свойства.

В климатических условиях Эстонии очень важным фактором являются изоляционные свойства материала, чтоб процессы происходили и в холодные периоды года.

Данные исследуемые типы почвенных фильтров имеют преимущества в очистке в зимний период, так как бактериальные сообщества более изолированы от влияния холодного воздуха (Wittgren, Maehlum 1997).

Легкий керамзит.

Легкий керамзит годен в использовании благодаря своей хорошей водной проводимости, большой пористости, возможности адсорбции фосфора и теплоудерживающим свойствам. Угловатость фильтрующего материала уменьшает размер воздушных пузырьков и тем самым изменяет аэрационную эффективность, также на нее напрямую влияют водопроводящие и пористые свойства фильтрующего материала (Jenssen, Krogstad 2003).

В фильтрующем материале легкий керамзит есть хорошие предпосылки для связывания фосфора в почвенных фильтрах, высокий pH (> 10), алюминия ($> 10 \text{ мг г}^{-1}$) и содержания CaO (3 %), Na₂O (2 %), C (0,02 %), SiO₂ (62 %), Al₂O₃ (18 %), FeO₃ (7 %), K₂O (4 %), MgO (3 %) (www.maxit.ee).

Основное связывание фосфора происходит в керамзите двумя механизмами: осаждением Ca и связыванием соединениями Fe и Al.

Этот материал в 4 раза легче, чем природные материалы (песок, гравий и т.д.) и благоприятен для роста микроорганизмов (Johanson 1997).

Известняковый щебень.

Материал известняковый щебень состоит в основном из кальцита (карбонат кальция Ca CO₃).

Показатели качества материала: массовая доля Ca CO₃ не менее 85 %.

Mg CO₃ не более 15 %;

насыпная плотность (тонн /м³): фракция 0-5 мм – 1,45;
фракция 5-20 мм- 1,39;
фракция 20-30 мм-1.40

3.2. Описание основного очистного сооружения в Нью

Испытательное сооружение расположено рядом с поселковым очистным сооружением Нью в юго-восточной части Эстонии.

В основном очистном сооружении используется искусственный метод биологической очистки сточных вод.

Состав сточных вод весьма разнообразен. Присутствуют производственные сточные воды, образующиеся в результате использования воды в технологическом процессе деятельности молочного и мясного комбинатов, также бытовые сточные воды, в основном с населенного пункта Нью, характеризующиеся содержанием органических веществ в разных фазово-дисперсных состояниях, и атмосферные (дождевые) сточные воды, содержащие минеральные примеси и отличающиеся эпизодичностью и неравномерностью.

3.3. Объект исследования

Данная работа изучает экспериментальное пилотное сооружение по очистке сточных вод в Тартуском уезде Ныюской волости.

Экспериментальное пилотное сооружение введено в эксплуатацию в четвертой декаде 2005 года.

Общий вид испытательного сооружения показан на рисунке 1.



Рисунок 1. Общий вид испытательного сооружения. Стрелки обозначают направление тока сточных вод.

Экспериментальное сооружение состоит (смотрите последовательность на рисунке 1):

- двухкамерного отстойника в 2 м^3 , который осуществляет разбавление и отстаивание, а также распределение поступающего (концентрированного) потока сточной воды в дальнейшем;
- приточного колодца, который распределяет поступающий (концентрированный) поток сточной воды, принимает прошедшую очистку воду, разбавляет концентрированную воду с очищенной;
- разделенной пополам пластиковой испытательной камеры с вертикальным протоком, общей площадью 8 м^2 , наполненной легким керамзитом (Filtralite S) и известняковым щебнем;
- промежуточного колодца, осуществляющего подачу сточной воды в горизонтальный фильтр;

- разделенной пополам испытательной системы с горизонтальным протоком площадью 20 м²;
- и колодца с оттоком, осуществляющим обратную перекачку сточной воды в первичный колодец с целью разбавления концентрированной загрязненной воды.

Для изучения работы испытательного водоочистного сооружения используется сточная вода, прошедшая первичную обработку через удаление грубых частиц. Суточный объем подаваемой сточной воды регулируется управляемым таймером насосом. Сточную воду вначале откачивают в отстойник, затем она самотеком попадает в колодец притока. Из колодца притока сточную воду перекачивают с помощью насосов, регулируемых поплавками, в две параллельные испытательные ванны вертикального потока. Посреди приточного, промежуточного и отточного колодцев построены промежуточные стены, чтоб держать воду двух параллельных испытательных систем по отдельности. Из отточного колодца вода течет через сливной колодец в канаву, примыкающую к территории водоочистного сооружения Нью.

3.3.1 Вертикальный почвенный фильтр

Глубина конструкции почвенных фильтров с вертикальным оттоком – 0,7 м, размеры составляют 2 м в длину и 2 м в ширину в обеих разделенных системах.

Почвенный фильтр вертикального оттока левой системы (Д) (см. на рисунке 2) заполнен легким керамзитом (Filtralite S) таким образом:

- Верхний слой Filtralite S (фракция 2-4 мм) – слой 20 см;
- Средний слой Filtralite M (фракция 4-10 мм) – слой 20 см;
- Нижний слой Filtralite L (фракция 10-20 мм) - слой 25 см.

В период с 09.11.2005 г. до 30.11.2005 г. правая система вертикального фильтра (Б) (см. рисунок 2), была заполнена пеноблочной крошкой, которая впоследствии была снята с эксперимента, так - как материал не обладал достаточной фильтрационно-пропускной способностью по причине засорения и уплотнения в нижнем слое (25-30 см от основания системы), поэтому первоначальный фильтрующий материал был заменен на известняковый щебень.

Правая камера вертикального фильтра (Б) (см. рисунок 2) заполнена известняковым щебнем следующим образом:

- Верхний слой (фракция 12-32 мм)- слой 25 см;
- Средний слой (фракция 8-16 мм) – слой 20 см;
- Нижний слой (фракция 2-8 мм) - слой 20 см.



Рисунок 2. Вертикальный почвенный фильтр. Обозначение букв: (А)-приемный колодец сточной воды, (Б) - правая камера вертикального почвенного фильтра (материал - известняковый щебень), (С) – легкий керамзит или Filtralite S, (D) – промежуточный колодец оттока воды с вертикальных фильтров.

Разливные трубопроводы двух параллельных почвенных фильтров вертикального и горизонтального потока различны, обеспечивают равномерное распределение воды на поверхность фильтрующего материала. Разливной трубопровод правостороннего фильтра состоит из трех разветвленных параллельных труб, расстояние между которыми 0,8 м (см. рисунок 3).

Диаметр пластмассовых напорных труб - 25 мм, в них просверлены отверстия в 6 мм через каждые 30 см.

Разливной трубопровод левостороннего вертикального фильтра состоит из шланга диаметром 26 мм, где просверлены отверстия в 6 мм через каждые 30 см. Шланг расположен формой спирали с постепенным заглублением в грунт.

На дне фильтров вертикального потока помещены диагональные дренажные трубы диаметром 50 мм, которые собирают протекающую через фильтры воду и направляют ее в промежуточный колодец, а также способствуют аэрации воздуха для окислительного процесса в обоих вертикальных фильтрах (см. рис. 3)

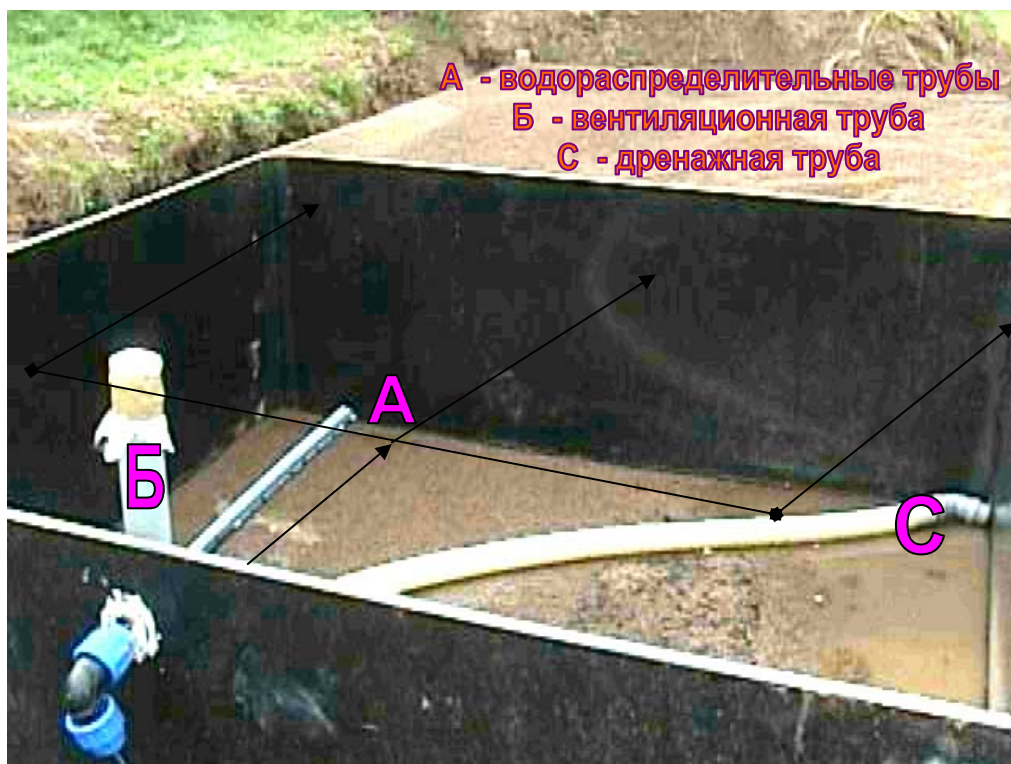


Рисунок 3. Аэрационная и водораспределительная система вертикального почвенного фильтра. Используемый материал в пустой камере – известняковый щебень. Используемый фильтрующий материал в заполненной камере – облепченный керамзит.

Для нормального функционирования биофильтра необходимо обеспечить достаточное поступление кислорода воздуха. Аэрация для данного объекта исследования определяется типом биофильтра и климатическими условиями размещения сооружения. Применяемая аэрация сточной воды принудительна, для этого используются глубинные насосы. В процессе перекачивания воды происходит смешивание и обогащение кислородом и углекислым газом, прошедшее через фильтрацию сточной воды.

3.3.2. Горизонтальный почвенный фильтр

Разделенные почвенные фильтры горизонтального протока общей площадью 20 м², глубиной в 1,0 м. Обе системы (А - правая и Б - левая сторона почвенного фильтра) имеют размеры 5 м в длину и 2 м в ширину (см. рис. 3).

На всем протяжении камеры горизонтальных почвенных фильтров наполнены легким керамзитом - Filtralite S (фракция 2-4 мм).

Трубопровод притока и трубопровод оттока расположены на самых длинных сторонах фильтров, они построены из 50 мм дренажной трубы. Трубопровод притока размещен на дне фильтра и трубопровод оттока – на глубине 15 см от верхнего края фильтра (см. рис. 4 - верхний вид сооружения). Далее вода направляется в колодец оттока сточной воды горизонтального фильтра.

В данной системе созданы также возможности для обратного откачивания воды из промежуточного колодца в колодец притока и из колодца оттока в колодец притока. Работа обратного откачивания управляется таймером. (см. дополнение 3).

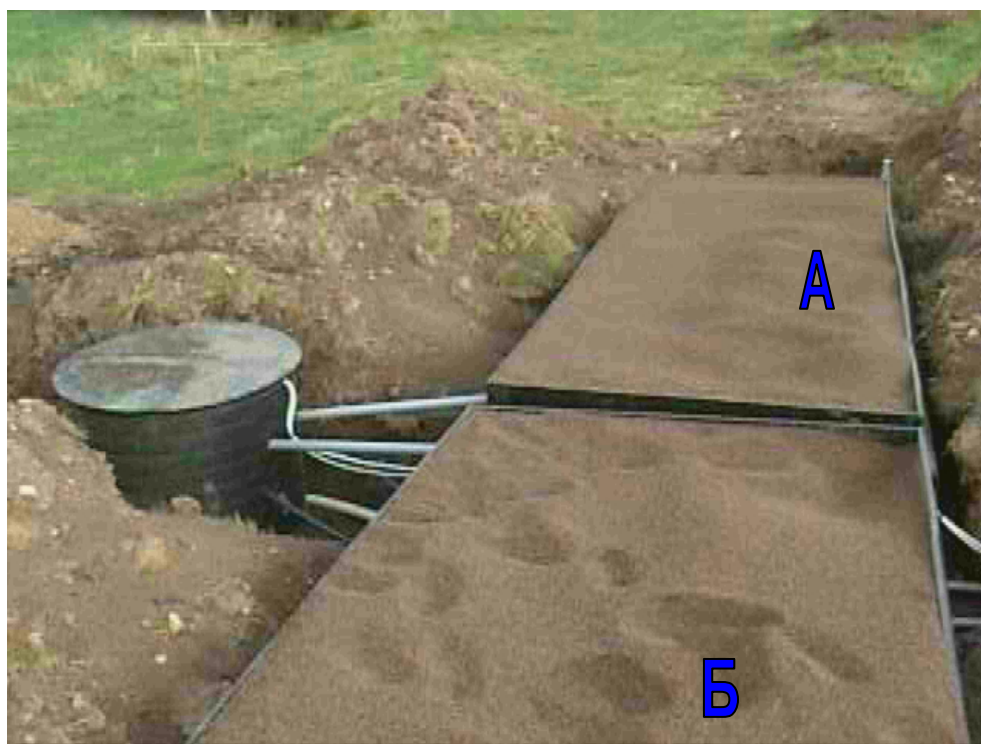


Рисунок 4. Горизонтальный почвенный фильтр. (А) – правая камера горизонтального почвенного фильтра (фильтрующий материал - легкий керамзит Filtralite S), (Б) – левая камера горизонтального почвенного фильтра (фильтрующий материал - легкий керамзит Filtralite S).

Испытательные камеры сверху покрыты утеплительными пенопластными плитами толщиной 5 см, чтоб избежать возможности замерзания, обусловленную небольшими порциями потока сточной воды на протяжении испытательного периода (09.11.2005-22.03.2006).

3.4. Принцип работы испытательного сооружения

В испытательном приборе почвенного фильтра вертикального протока происходит аэрация грязной воды, разложение большей части органики и нитрификация.

В почвенном фильтре горизонтального протока в большей части потребляется кислород, среда становится анаэробной и происходит денитрификация и другие анаэробные процессы. В то же время происходит и адсорбция фосфора на поверхность легкого керамзита и в результате этого удаление фосфора из загрязненной воды, (адсорбция фосфора происходит также и в фильтрах с вертикальным протоком).

Если эффективность аэрации снижается, возможно осуществить обратную откачку из промежуточного колодца в колодец притока и таким образом повысить эффективность нитрификации. Так как денитрификация для функционирования предполагает наличие органики, которую быстро разлагают в вертикальном фильтре, денитрификация в фильтре горизонтального протока может вследствие недостатка органики оказаться неэффективной. В этом случае часть сточной воды откачивают из колодца оттока обратно в колодец притока, где присутствуют анаэробные условия и (сырая) концентрированная богатая углеродом грязная вода, с помощью которой могут происходить процессы денитрификации уже нитрифицированной загрязненной воды.

Цель обратного откачивания – применение “предварительной нитрификации”. В ходе различных испытательных циклов определяется оптимальное количество воды, откачиваемой обратно, чтоб достичь соответствующий требованиям эффект очистки.

3.5. Испытываемые режимы в исследуемом объекте

В испытательной системе Нью задействованы два параллельных комбинированных искусственных почвенных фильтра. В обеих параллельных системах испытываются отличия в разделительной системе почвенного фильтра с вертикальным протоком, а также и различные рабочие режимы. Количество воды, направляемое на обе параллельные системы, показано в таблице 1.

Таблица 1. Суточный режим распределения сточной воды (м³) по циклам в вертикальный почвенный фильтр

Циклы	Правая камера			Левая камера		
	Кол-во поступлений воды	Интервал времени (в часах)	Объем порции воды (в м ³)	Кол-во поступлений воды	Интервал времени (в часах)	Объем порции воды (в м ³)
1 цикл	9	2,5	0,19	9	2,5	0,097
2 цикл	9	2,5	0,055	9	2,5	0,111

Также изучается режим рециркуляции (т.е. обратное откачивание) (см. табл. 2). В испытательных циклах испытываются также различные нагрузки на пилотное сооружение, чтобы установить, какую максимальную нагрузку загрязнения система может очистить (устанавливают на основе изменения количества воды, управляемого системой), как показано в таблице 2.

На вертикальный фильтр поступает смешанная сточная вода которая состоит из поступившей концентрированной и обратно откачанной воды из горизонтального почвенного фильтра.

Для расчета эффективности очистки вертикального фильтра вычислена концентрация притока следующим образом:

$$П = (К + Р * А) / (Н + Р), \quad (7)$$

где

- П – концентрация в правой трубе распределительного колодца (мг/л);
- Р- обратное откачивание очищенной сточной воды из горизонтального фильтра, фильтрующий материал - легкий керамзит (л/сутки);
- К- концентрация откачанного притока сточной воды (мг/л);
- Ап - концентрация очищенной сточной воды в горизонтальном фильтре правой камеры (мг/л);
- Н- гидравлическая нагрузка в м³ в сутки;

Таблица 2. Гидравлическая нагрузка (м3 в сутки) и режимы обратного откачивания по циклам (%) левой и правой стороны.

Циклы	1 цикл (09.11.2005-28.12.2005)		2 цикл (28.12.2005-22.03.2006)	
Горизонтальный фильтр	Левая камера	Правая камера	Левая камера	Правая камера
Нагрузка (м ³ /сутки)	1	1	0,5	0,5
Обратное откачивание (%) из колодца оттока на вертикальные камеры	100%	75%	100%	75%

$$Л = (К + В) / (Н + Р), \quad (8)$$

где

- Л - концентрация сточной воды в левой трубе распределительного колодца (мг/л);
- В - рециркуляция очищенной сточной воды из горизонтального фильтра левой камеры (л);
- Ал - концентрация очищенной сточной воды в горизонтальном фильтре левой камеры (мг/л);

3.6. Температурный режим

Температурный режим в зимний период представлен внешней температурой и температурой сточной воды в момент взятия анализа проб в анализируемых циклах. В анализе эффективности очистки сточных вод в зимний период существенно влияние отрицательных температур. Она отразилась на результатах статистических данных (проявились существенные различия в сравнении временных циклов между камерами, сторон почвенных фильтров в различные временные циклы).

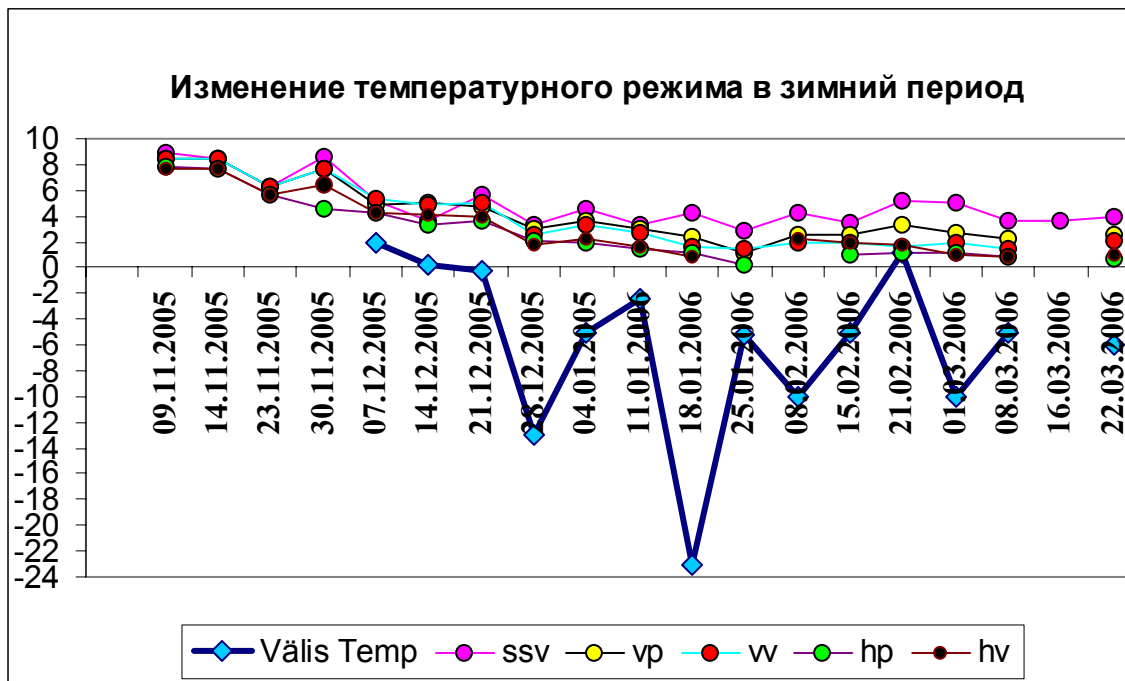


Рисунок 5. Изменение температурного режима в зимний период (в °C), (Välis Temp-внешняя температура, ssv-температура сточной воды притока и оттоков вертикального правого, vv-вертикального левого, hp-горизонтального правого, hv-горизонтального левого почвенных фильтров).

3.7. Анализ проб воды

Исследуемый промежуток времени был разбит на 2 цикла, первый цикл начал работать с 9 ноября 2005 года по 28 декабря 2005 года. Впоследствии первый цикл был разделен на два подцикла: 1(а) цикл (09.11.2005г. - 30.11.2005г.) и 1(б) цикл (07.12.2005г. - 28.12.2005г.), в связи с заменой фильтрующего материала (блочной крошки) в вертикальном фильтре правой камеры на известняковый щебень в результате изменения физико-химических свойств исследуемого материала.

Второй цикл анализировался с 28.12.2005 по 22.03.2006 года. В этот промежуток времени планомерно был изменен режим поступления и рециркуляции сточной воды.

В связи с этими изменениями соответственно менялись и результаты анализов.

Пробы набирались в литровые бутылки и анализировались в лабораториях Института Технологий Тартуского Университета и АО Тартуский Водопровод (AS Tartu Veevärk) для определения следующих параметров: pH, БПК₇, ХПК, Взвешенных веществ, Общего фосфора, Общего азота, NH₄-N, NO₃-N, NO₂-N.

Пробы взяты со следующих пунктов (смотрите обозначенные зелеными пунктами места в дополнении 3):

- поступление концентрированной сточной воды (через септик) мг/л;
- отток сточной воды правой камеры вертикального фильтра (литров/сутки);
- отток сточной воды левой камеры вертикального фильтра (литров/сутки);
- Отток сточной воды правой камеры горизонтального почвенного фильтра (литров/сутки);
- Отток сточной воды левой камеры горизонтального почвенного фильтра (литров/сутки).

3.8. Эффективность очистки

Сравнительными признаками были эффективности очистки:

- БПК₇;
- ХПК;
- Взвешенных веществ;
- Общего N;
- Общего P;
- NH₄-N;
- NO₃-N;
- NO₂-N.

В данной работе сравнивались между собой:

- эффективность очистки (%) между 1(b) и 2 циклами в почвенных фильтрах по отдельности, показаны как (vp)-вертикальный правый, (vv)-вертикальный левый, (hp)-горизонтальный правый, (hv)-горизонтальный левый почвенные фильтры (в дополнение 4);

- эффективность очистки (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах (в дополнение 5);

- сравнение эффективности очистки (%) в двух временных циклах (1б и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров;

- сравнение эффективности очистки (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (vp-правый и vv-левый) и горизонтальных (hp-правый и hv-левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2 циклах;

- средние показатели эффективности очистки (%) в лв- левая сторона, пр - правая сторона, vp – вертикальном правом, vl – вертикальном левом, gp –горизонтальном правом , gl – горизонтальном левом почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.(Рис.7, 11, 15, 19, 22, 26).

В виду того, что в 1(а) цикле регулировали оптимальные режимы поступления сточных вод и вышел из строя вертикальный правый почвенный фильтр, данные эффективности очистки, возможно, не соответствуют действительности. В связи с этим конкретней анализировались данные 1 (б) и 2 циклов.

Эффективность очистки индикаторов качества воды была рассчитана представленным уравнением (Kadlec, Knight 1996):

Эффективность очистки (Е; %):

$$E = ((C_{in} - C_{out}) / C_{in}) * 100 \quad (10)$$

- C_{in} – концентрация поступившей воды;
- C_{out} – концентрация оттока воды.

3.9. Статистическая обработка данных и их анализ

Вычисления произведены табельной расчетной программой MS Excel.

В статистическом анализе использовали программное обеспечение Статистика 6,0.

Чтобы проверить соответствие нормальному разделению, использовали тесты Kolmogorow-Smirnov & Lillefors' и Shapiro-Wilks'. Для сравнения средних значений при нормальном распределении использовали т-тесты и парные т-тесты.

Когда распределение признака отличалось от нормального при сравнении двух групп средних значений, использовали непараметрические методы Mann-Whitney' U-тест значения указаны как (m) и Wilcoxon Matched Pairs-тест значения указаны как (w).

Доверительный уровень $\alpha = 0,005$. Если по результатам тестов $p < 0,05$, $p < 0,01$, $p < 0,001$, то это обозначено соответственно как *, **, или ***.

На рисунках показаны медианы, квартилы, минимальные и максимальные значения.

4. Результаты

4.1. БПК₇

БПК₇ выделяется неравномерной концентрацией поступающей концентрированной сточной воды.

Данные анализов рисунка 6 показывают, что в первом (а) и в первом (б) циклах среднее содержание БПК₇ больше в правом горизонтальном фильтре (hfp). Это объясняется тем, что левый вертикальный фильтр (vfp) системы потерял фильтрующую способность в результате затора и уплотнения нижнего слоя фильтрующего материала в первом (а) цикле, что повлекло постепенное поверхностное затопление (hfp) и увеличение содержания БПК₇ в первом (а) цикле и его последствие в первом (б) цикле.

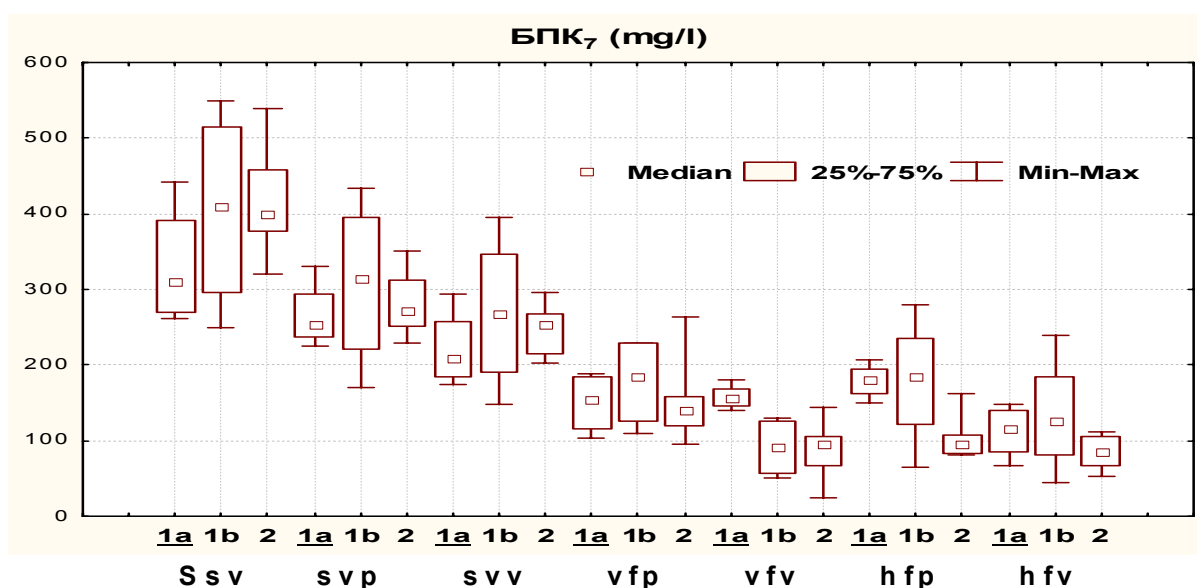


Рисунок 6. Концентрация БПК₇ (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах

Во 2 цикле положительно повлиял фактор уменьшения количества сточной воды на вертикальный левый (vfv), горизонтальный левый (hfv), горизонтальный правый (hfp) почвенных фильтров. Повышенное содержание БПК₇ в вертикальном правом фильтре (vfp) объясняется слабой теплоудерживающей способностью известнякового щебня при отрицательных температурах, в результате которого процессы удаления БПК₇ затормаживаются.

На рисунке 7 показана зависимость влияния отрицательных температур во 2 цикле (в период с 11.01.06 до 18.01.06). В вп и вл почвенных фильтрах эффективность очистки заметно убывает, однако в горизонтальных фильтрах идет обратный процесс, что значительно повышает эффективности очистки. Это объясняется присутствием сточной воды в системе, а также хорошей теплоудерживающей способностью фильтрующего материала. При сравнении эффективности очистки сторон на рисунке 7 видим преимущество почвенных фильтров левой стороны, где применялась комбинация фильтрующего материала легкого керамзита в обоих почвенных фильтрах.

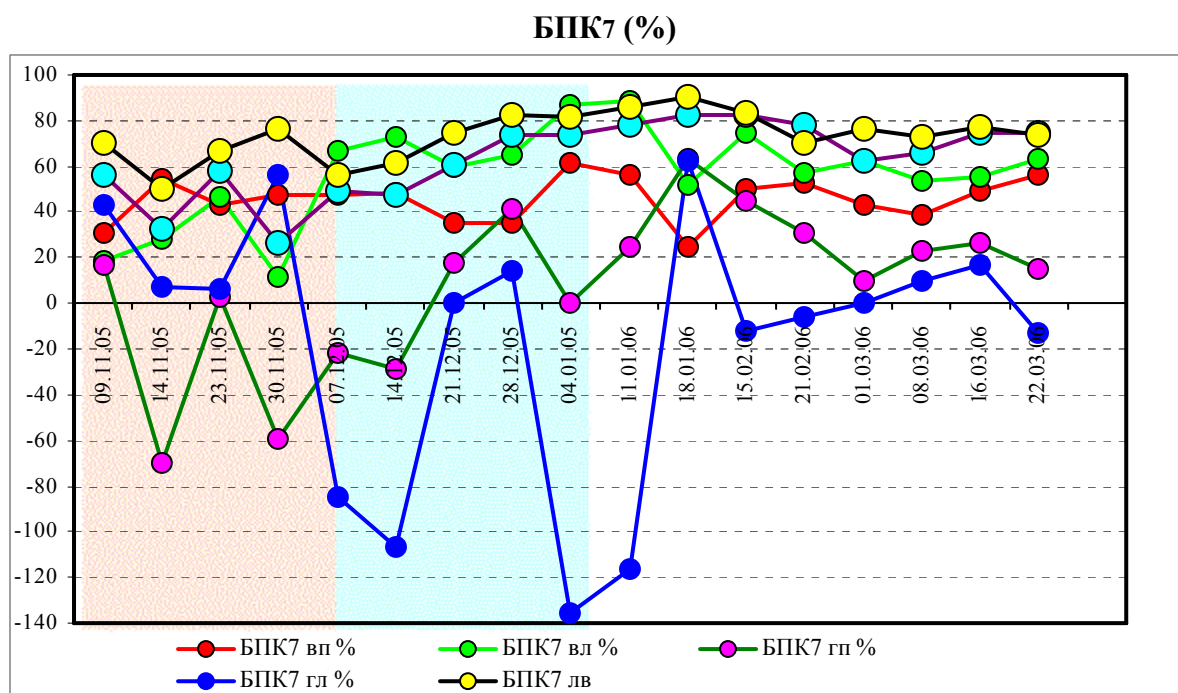


Рисунок 7. Сравнение средних показателей эффективности очистки (%) БПК7 в (вп) – вертикальном правом, (вл) – вертикальном левом, (гп) – горизонтальном правом, (гл) – горизонтальном левом, (лв) – левая сторона, (пр) – правая сторона (отмечена голубым кружочком) почвенных фильтров в фильтровальной системе. Фоновые цвета обозначают анализируемые временные циклы: розовый фон- 1(а) цикл ; голубой фон- 1(б) цикл ; обычный фон- 2 цикл.

Рисунок 8 показывает существенную разницу в правой стороне почвенных фильтров в 1б и 2 циклах. Во 2 цикле фактор уменьшения количества потока воды положительно влияет на эффективность очистки в целом в правом почвенном фильтре.

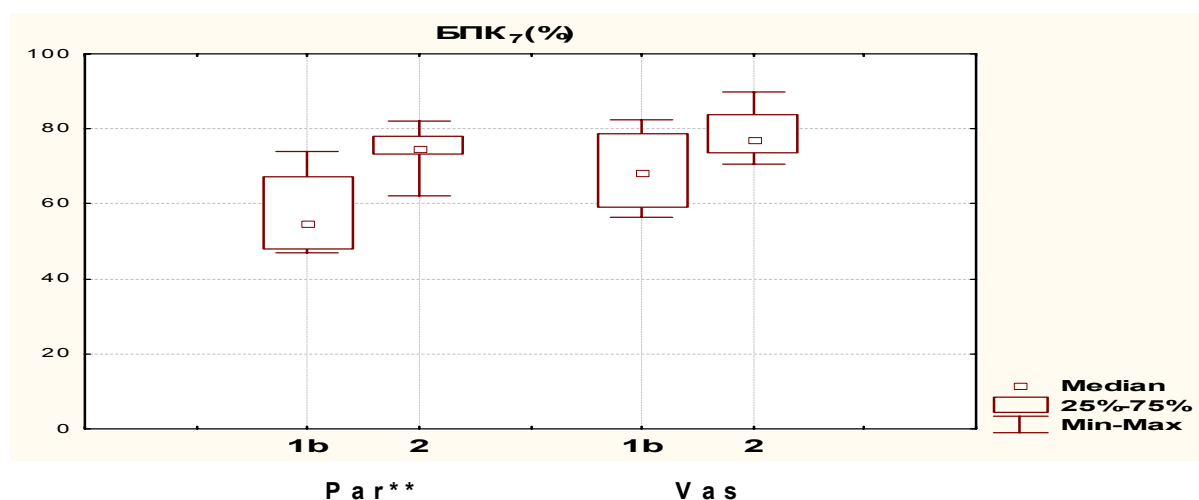


Рисунок 8. Эффективность очистки БПК7 (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах. Существенная разница по парному т-тесту между сторонами показывает как ** для $p < 0,01$.

На рисунке 9 видна существенная разница между правой и левой стороной 1(б) цикла. Возможно влияние последствия затопления в 1 (а) цикле для правой стороны почвенных фильтров. Для фильтрующих материалов левой стороны дал положительный эффект оптимальное распределения фракций материала по слоям, хорошая пористость, большая площадь поверхности материала, водоудерживающая и теплоудерживающая способности, возможность аэрации все это способствует повышению эффективности очистки БПК₇.

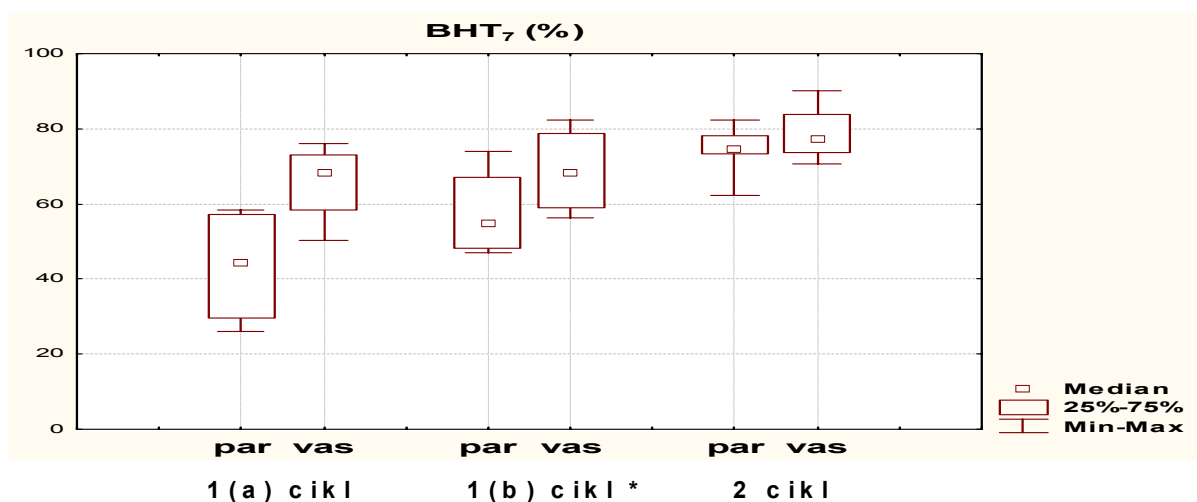


Рисунок 9. Сравнение эффективности очистки БПК₇ (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров. Существенная разница по т-тесту между циклами показана как **, если $p < 0,01$.

4.2. ХПК

Рисунок 10 отличается большим содержанием ХПК в 1(а) и 1(б) циклах почти во всех почвенных фильтрах, это может быть обусловлено большой гидравлической нагрузкой в первом цикле. Увеличение ХПК в hfr 1(а) цикле напрямую зависит от нарушения фильтрующей способности vfr в 1(б) цикле.

Меньшей концентрацией ХПК в 1(б) и 2 циклах отличаются левосторонние камеры, это связано с благоприятными условиями усвоения ХПК фильтрующим материалом легкий керамзит.

После уменьшения гидравлической нагрузки на испытываемое сооружение во 2 цикле анализ результатов средней концентрации ХПК лучше в vfv, hfp, hfv. Высокое содержание ХПК в почвенном фильтре vfp объясняется слабой усвояемой способностью ХПК фильтрующим материалом, а также нарушением работы фильтра из-за холодного периода.

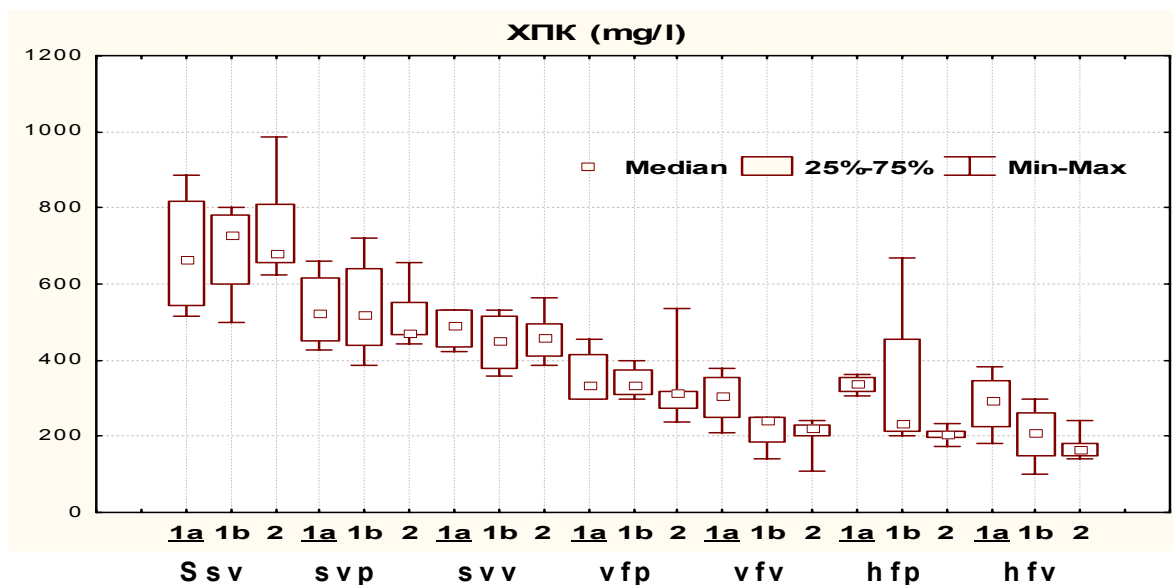


Рисунок 10. Концентрация ХПК (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

Рисунок 11 показывает температурную зависимость эффективности очистки во всем испытываемом сооружении в периодах анализов проб сточной воды (30.11.2005, 04.01.2005, 21.02.2006, 08.03.2006).

Сравнивая эффективность очистки между сторонами по циклам, лучше эффективность в левой стороне (фильтрующий материал – легкий керамзит), что доказывает преимущество использования данного фильтрующего материала в удалении ХПК в зимний период.

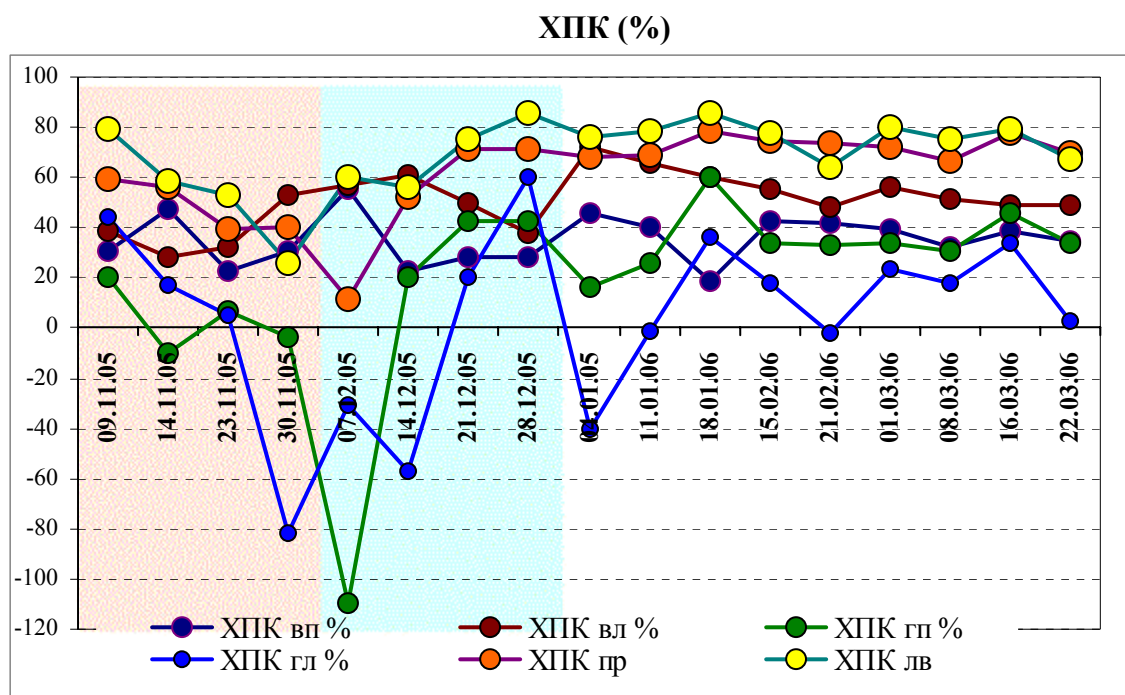


Рисунок 11. Сравнение средних показателей эффективности очистки (%) ХПК в лв-левая сторона, пр - правая сторона, вл – вертикальном правом, вл – вертикальном левом, гп –горизонтальном правом , гл – горизонтальном левом почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.

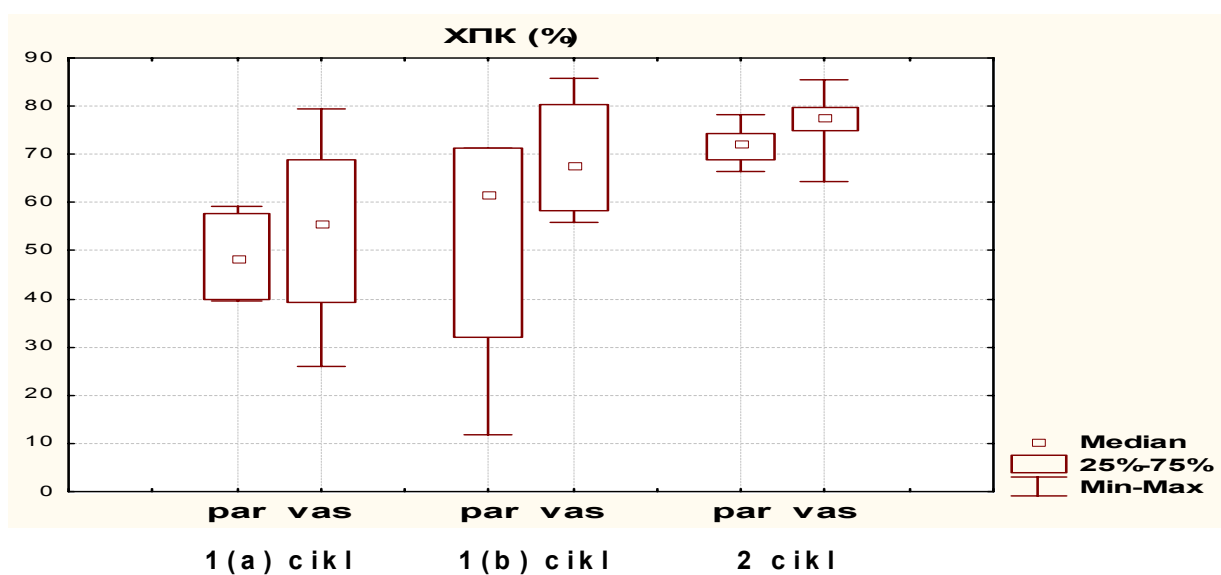


Рисунок 12. Эффективность очистки ХПК (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах.

В правой стороне системы очистки между циклами наблюдается существенная разница, увеличение эффективности очистки во 2 цикле непосредственно связано с уменьшением гидравлической нагрузки

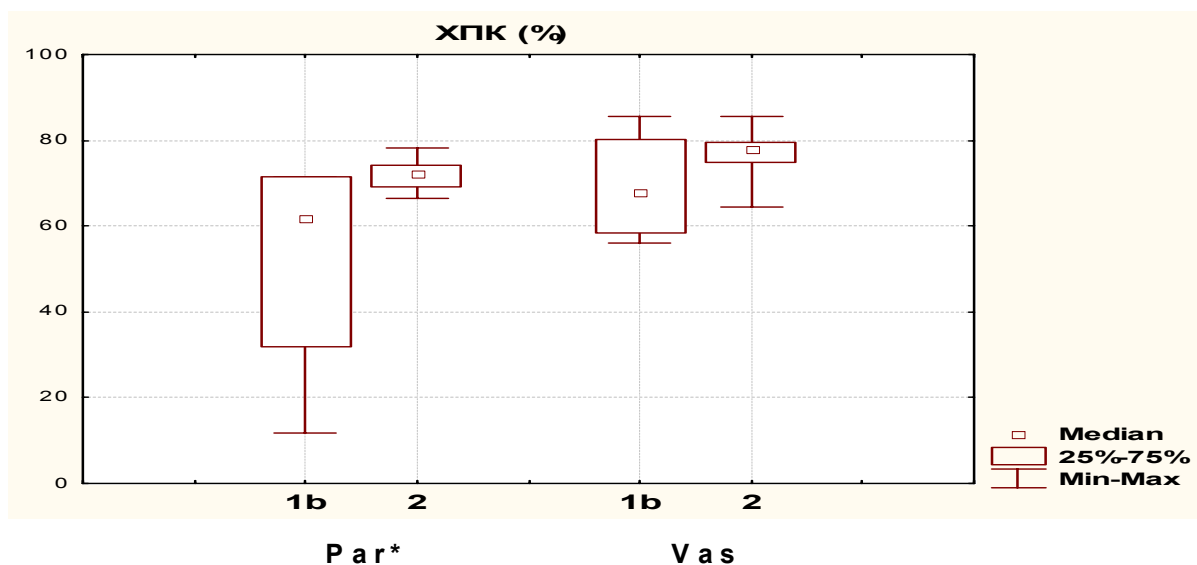


Рисунок 13. Сравнение эффективности очистки ХПК (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров. Существенная разница по t-тесту между циклами показана как * $p < 0,05$.

4.3. Взвешенные вещества

Рисунок 14 показывает, что снижение средней концентрации лучше в горизонтальных почвенных фильтрах. Это объясняется тем, что в этих фильтрах созданы все условия для усвоения взвешенных веществ.

Не исключено влияние структуры, физико-механических свойств фильтрующего материала, в особенности проявляющегося в v_{fr} , где происходит активное вымывание взвешенных веществ в горизонтальные почвенные фильтры. Причиной также могут быть высокая скорость потока сточной воды и размер взвешенных частиц, в результате которых биопленка на поверхности фильтрующего материала не успевает усваивать взвешенные вещества.

Существенное снижение концентрации взвешенных веществ в vfv доказывает хорошие физико-химические свойства фильтрующего материала легкого керамзита.

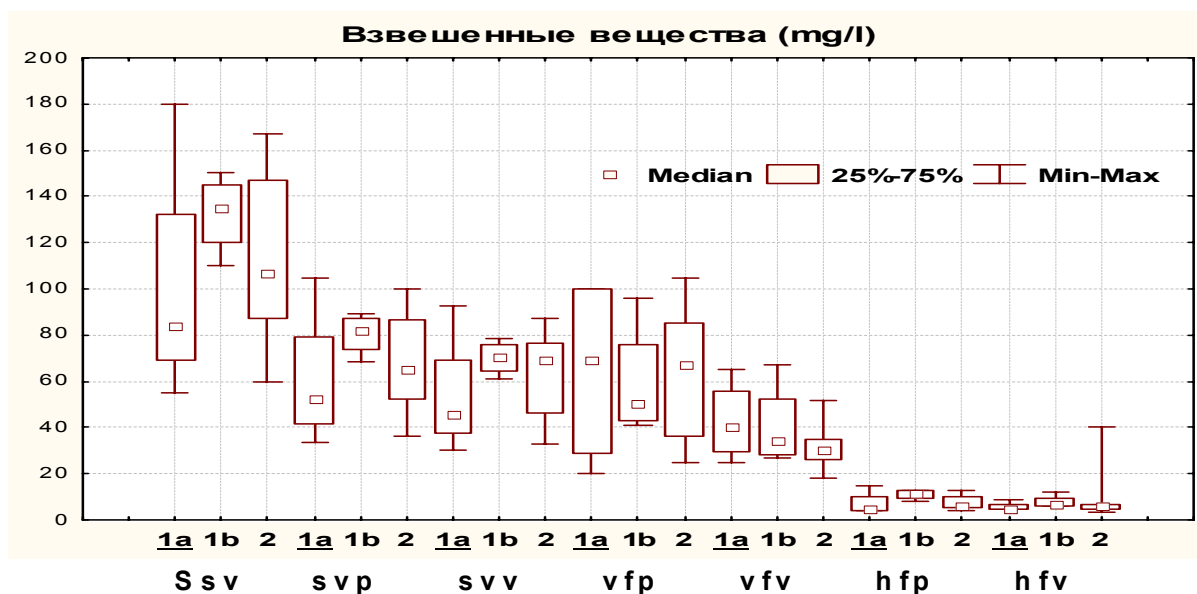


Рисунок 14. Концентрация взвешенных веществ (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

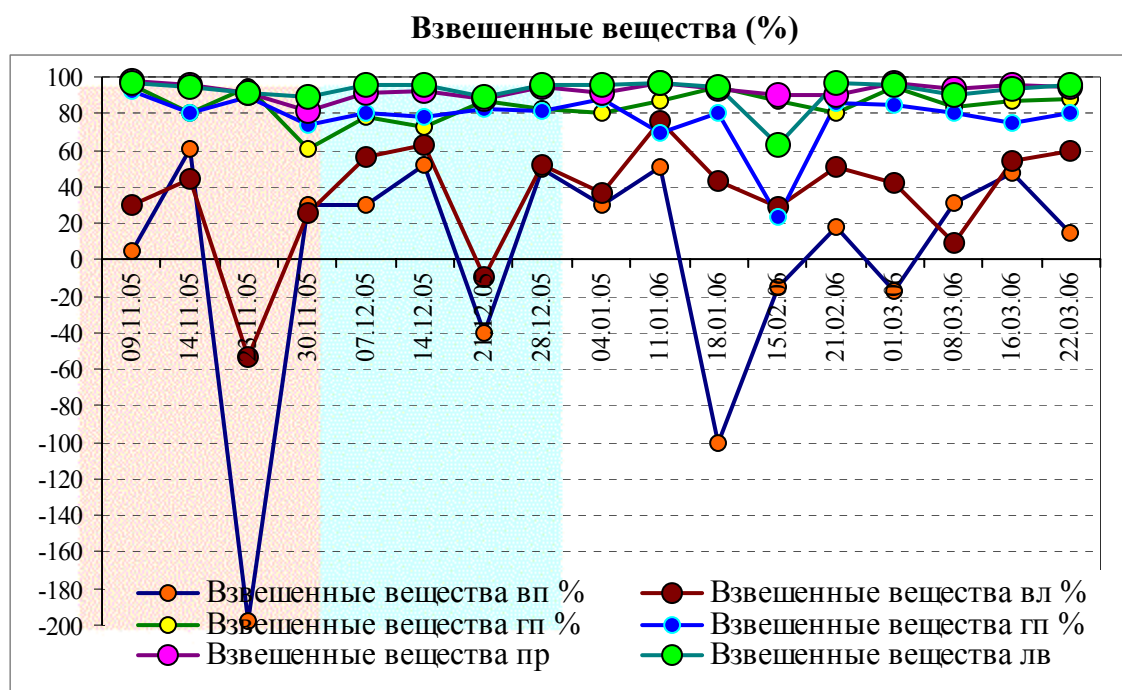


Рисунок 15. Сравнение средних показателей эффективности очистки взвешенных веществ в (%), лв - левая сторона, пр - правая сторона, вп – вертикальном правом, вл – вертикальном левом, гп –горизонтальном правом , гл – горизонтальном левом (синяя линия) почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.

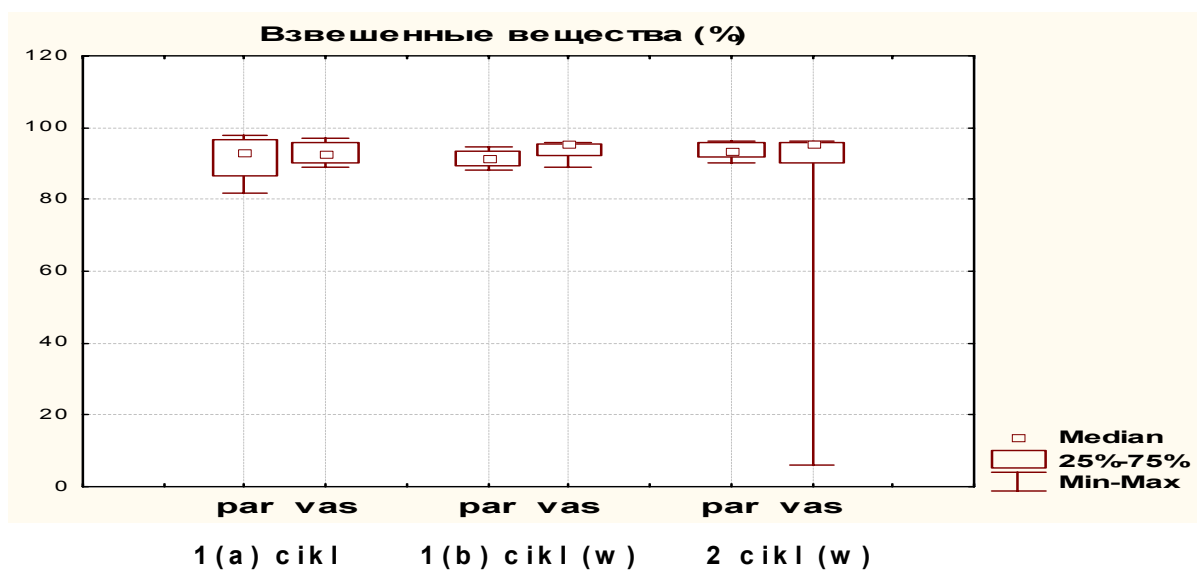


Рисунок 16. Эффективность очистки взвешенных веществ (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах. Wilcoxon-тест указан как (w).

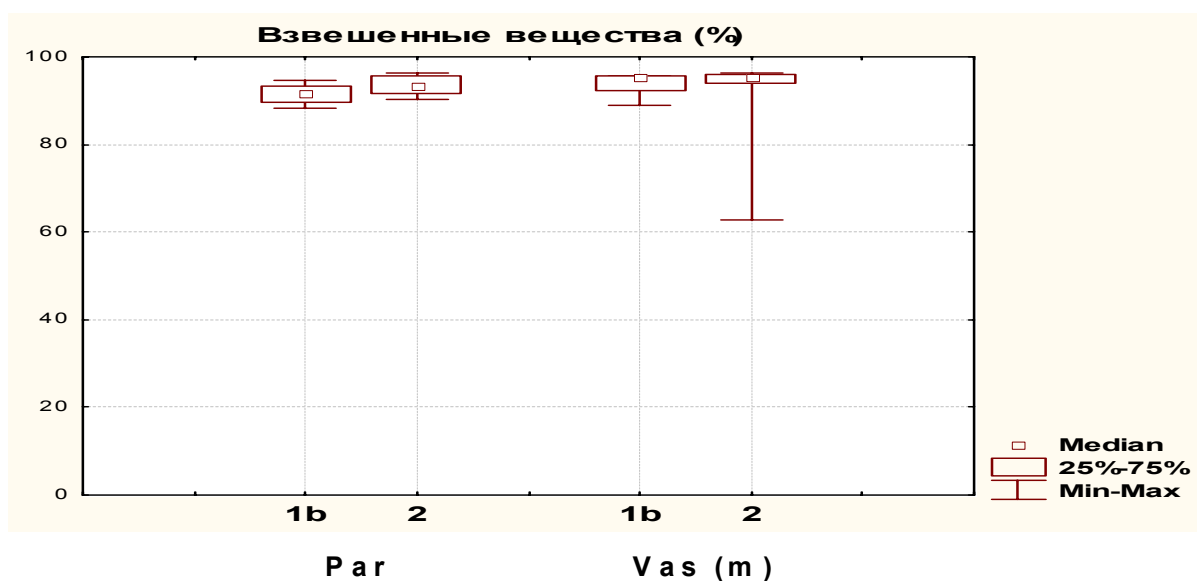


Рисунок 17. Сравнение эффективности очистки взвешенных веществ (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров. U-тест по Mann Whitney' показан как (m).

4.4. Общий Р

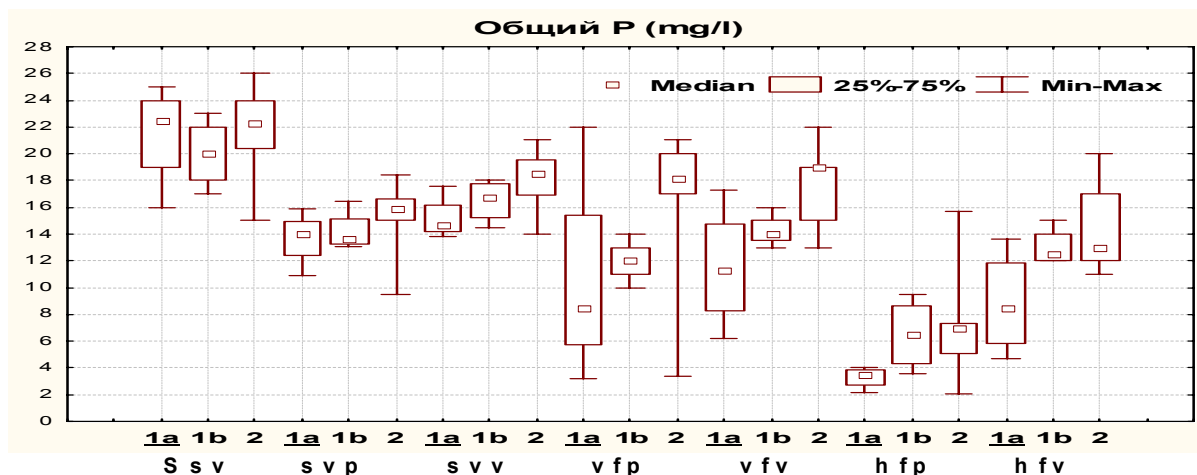


Рисунок 18. Концентрация общего Р (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp) – оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

Зависимость влияния изменений отрицательных температур в зимний период на эффективности очистки общего Р показан на рисунке 19.

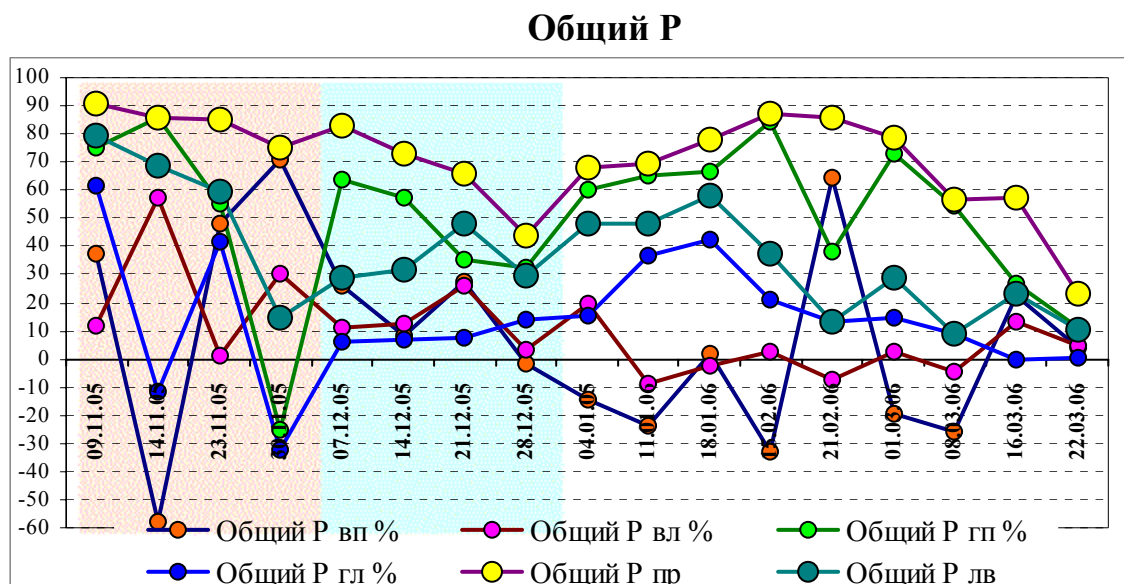


Рисунок 19. Сравнение средних показателей эффективности очистки общего Р (%), лв-левая сторона, пр - правая сторона, вл – вертикальном правом, вл – вертикальном левом, гп –горизонтальном правом , гл – горизонтальном левом почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.

На рисунке 20 выявлена существенная разница между сторонами системы почвенных фильтров во 2 цикле. Удаления общего фосфора (в процессе адсорбции) хорошо проявился фильтрующий материал известняковый щебень содержащий ионы кальция,

который способствует связыванию фосфорных соединений с дальнейшим их осаждением. Хороший эффект очистки в целом по правой стороне почвенных фильтров дала комбинация фильтрующих материалов вертикального и горизонтального почвенных фильтров.

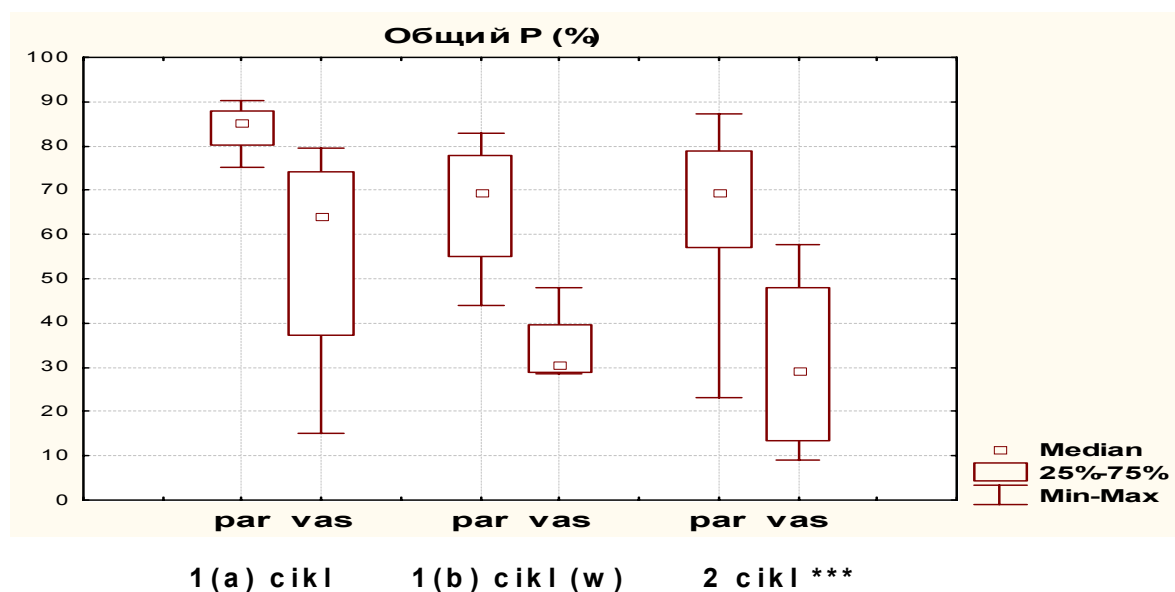


Рисунок 20. Эффективность очистки общего Р (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах. Существенная разница по парному т-тесту между сторонами показана как *** $p < 0,01$. Wilcoxon-тест указан как (w).

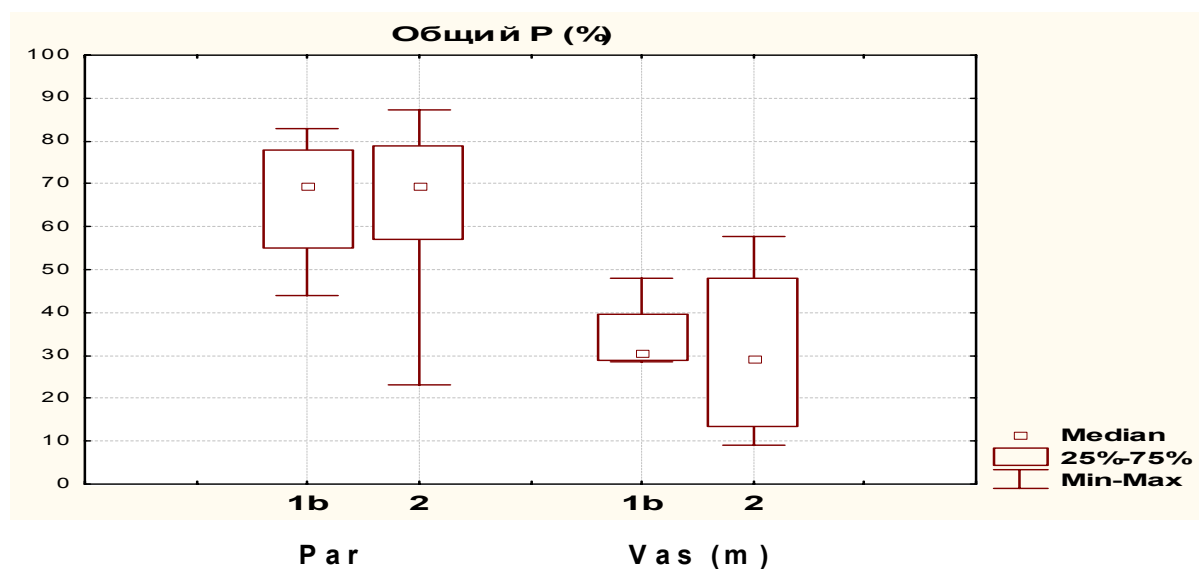


Рисунок 21. Сравнение эффективности очистки общего Р (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров. U-тест по Mann Whitney' указан как (m).

4.5. Общий N

Рисунок 21 показывает повышенное содержание концентрации общего N в 1(а) цикле. Это обусловлено слабым развитием фильтрующих материалов и слабой выраженностью микробной биомассы на единицу площади в анализируемом сооружении.

Эффект уменьшения концентрации общего N достигается снижением гидравлической нагрузки во 2 цикле.

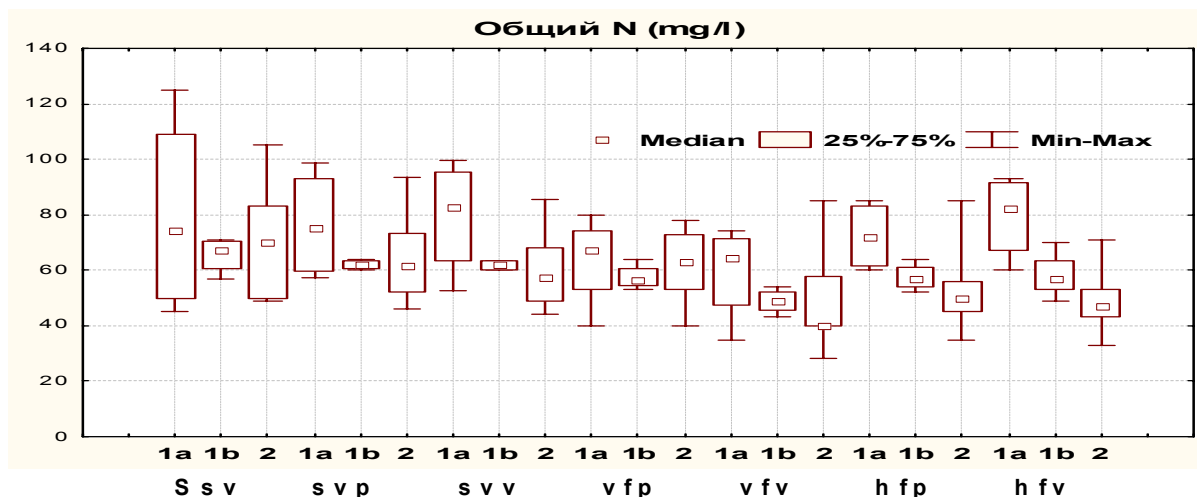


Рисунок 21. Концентрация общего N (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

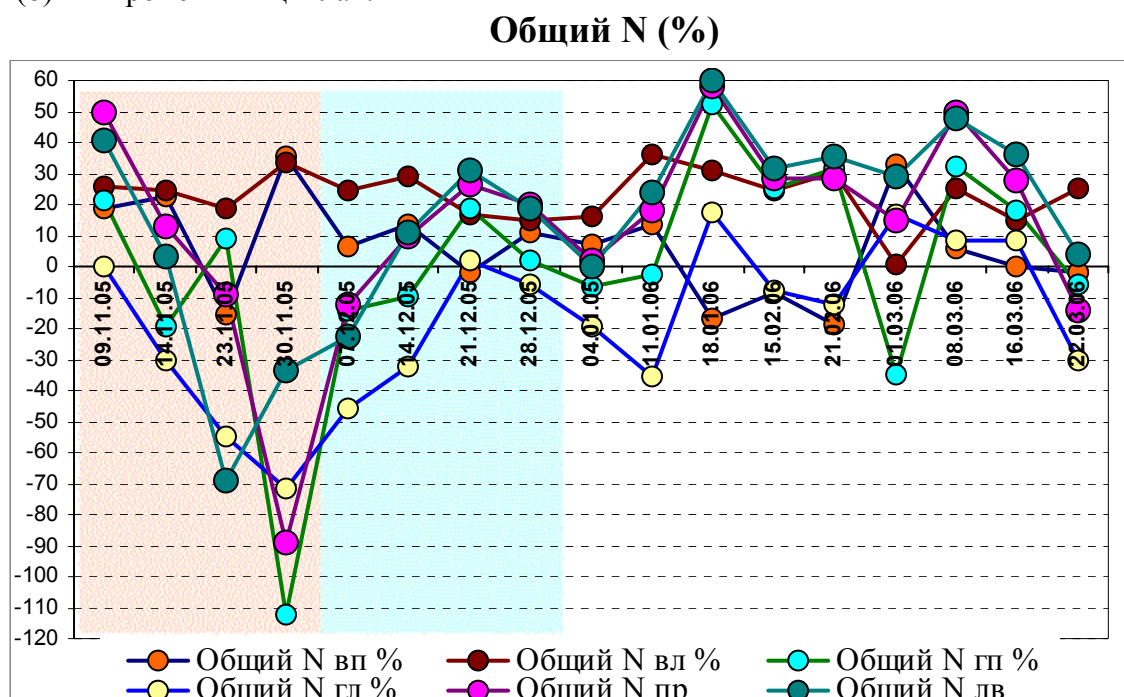


Рисунок 22. Сравнение средних показателей эффективности очистки общего N (%), лв-левая сторона, пр - правая сторона, вп – вертикальном правом, вл – вертикальном левом, гп –горизонтальном правом , гл – горизонтальном левом почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.

Рисунок 23 показывает преимущество комбинации фильтрующего материала (легкого керамзита) в обоих почвенных фильтрах левой стороны во 2 цикле, которая проявилась лучше в удаления азотсодержащих соединений в зимний период

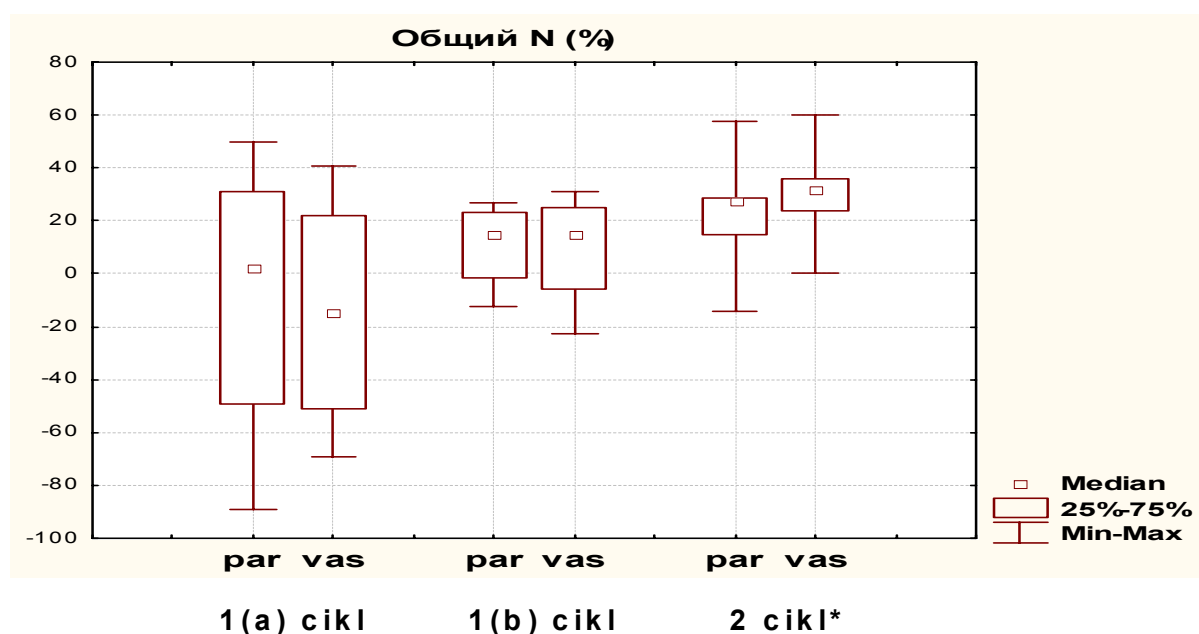


Рисунок 23. Эффективность очистки общего N (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах. Существенная разница по парному т-тесту между сторонами показывается как * для $p < 0,05$.

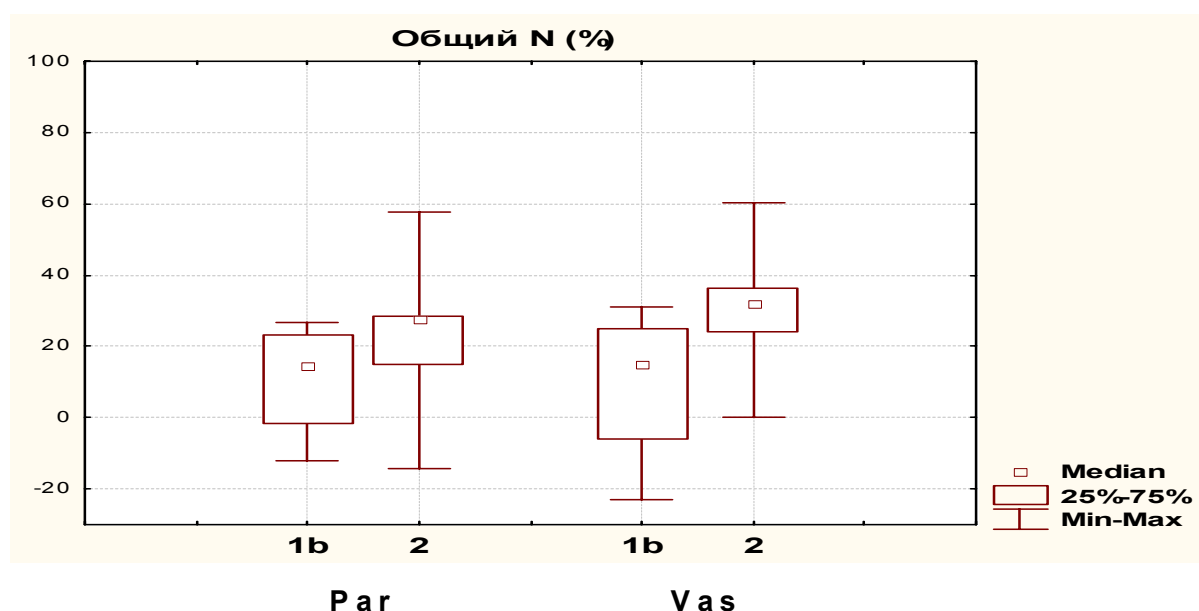


Рисунок 24. Сравнение эффективности очистки общего N (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров.

4.6. $\text{NH}_4\text{-N}$

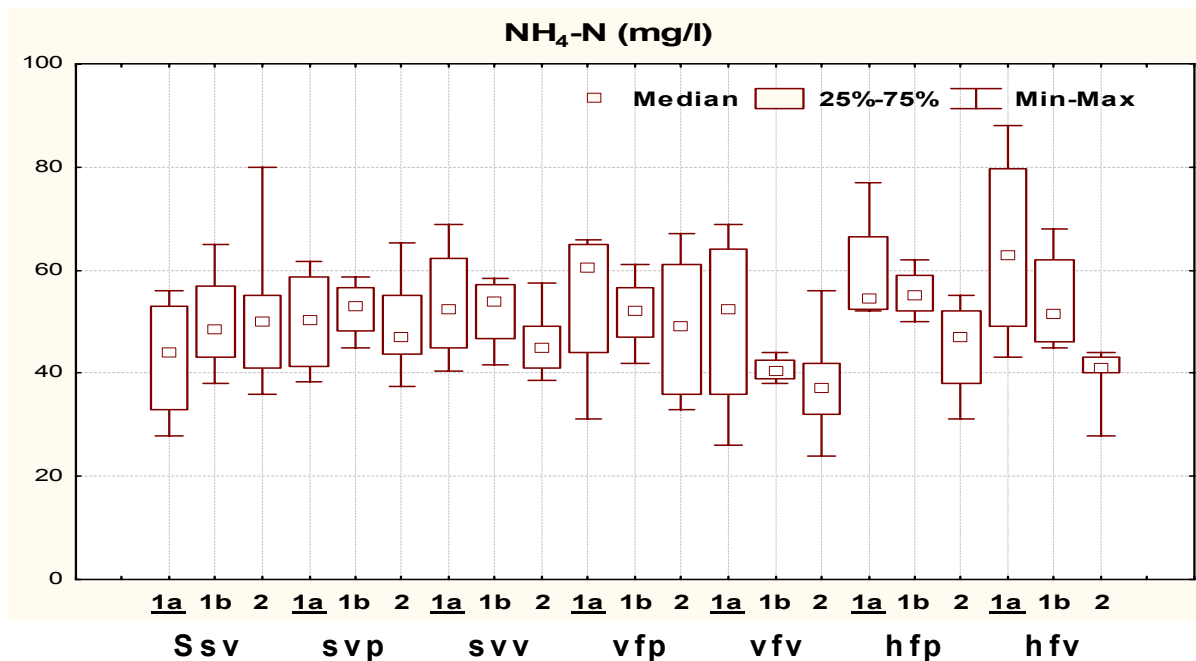


Рисунок 25. Концентрация $\text{NH}_4\text{-N}$ (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp) – оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(a), 1(б) и 2 временных циклах.

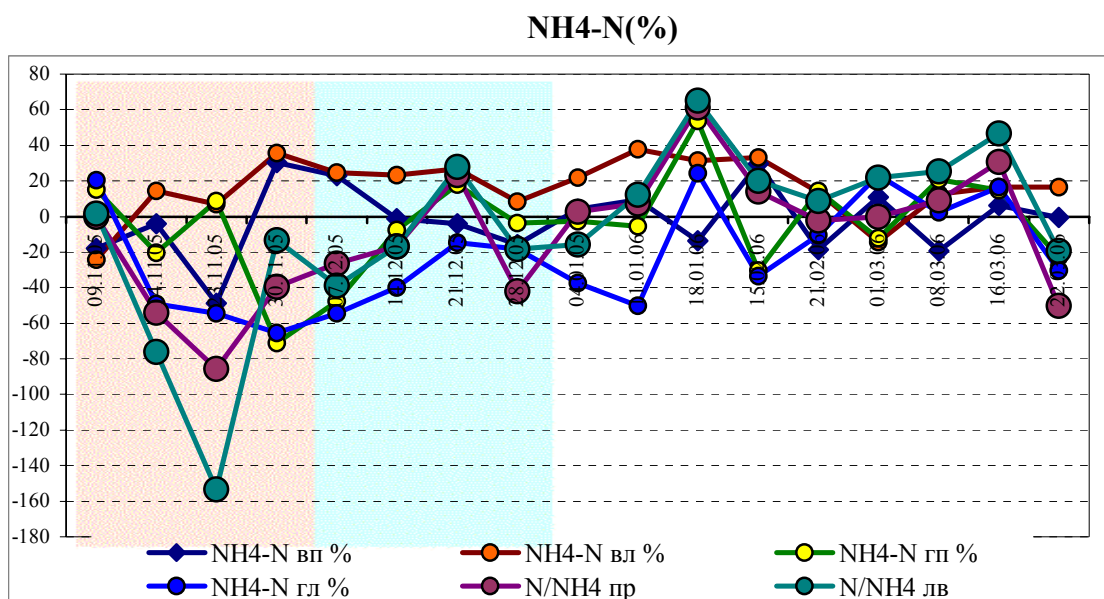


Рисунок 26. сравнение средних показателей эффективности очистки $\text{NH}_4\text{-N}$ (%), лв-левая сторона, пр - правая сторона, вл – вертикальном правом, вл – вертикальном левом, гл –горизонтальном правом , гл – горизонтальном левом почвенных фильтрах в обеих сторонах системы фильтров.

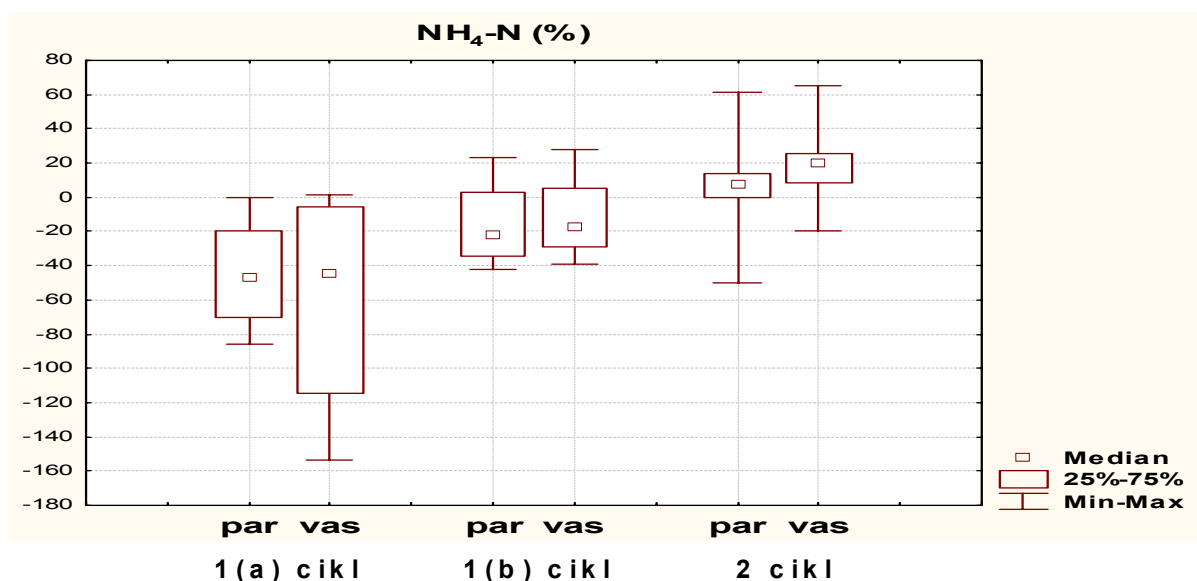


Рисунок 27. Эффективность очистки NH₄-N (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах.

На рисунке 28 эффективность очистки NH₄-N во 2 цикле в зимний период слабо отвечает требованиям эффективности очистки из-за влияния отрицательных температур. Это также обусловлено большой гидравлической нагрузкой на единицу площади в 1(b) цикле и в целом на все сооружение. Слабым содержанием доступной органики и поступления кислорода воздуха в горизонтальные фильтры, которые используется в основном в вертикальных фильтрах.

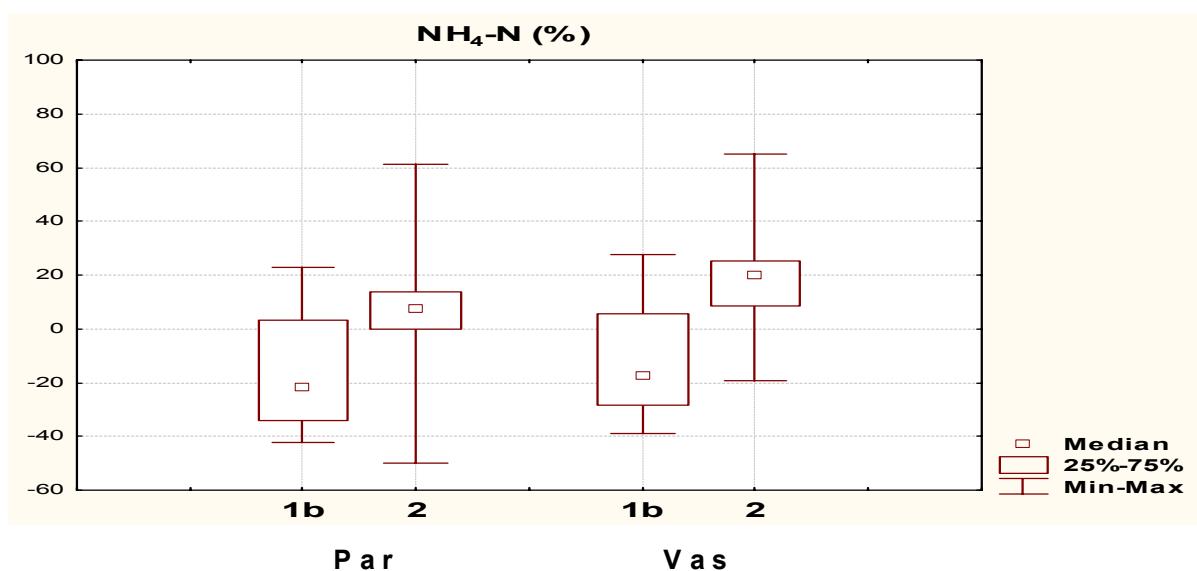


Рисунок 28. Сравнение эффективности очистки NH₄-N (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных комбинированных систем почвенных фильтров.

4.7. NO₃-N

На рис. 29 между почвенными фильтрами 1 (а) цикле существенного отличия не наблюдается. 1(б) цикле выражено слабое убывание NO₃-N в горизонтальных почвенных фильтрах.

Сильно выраженные стандартные отклонения видны в vfp и vfv во 2 цикле - это результат влияния отрицательных температур.

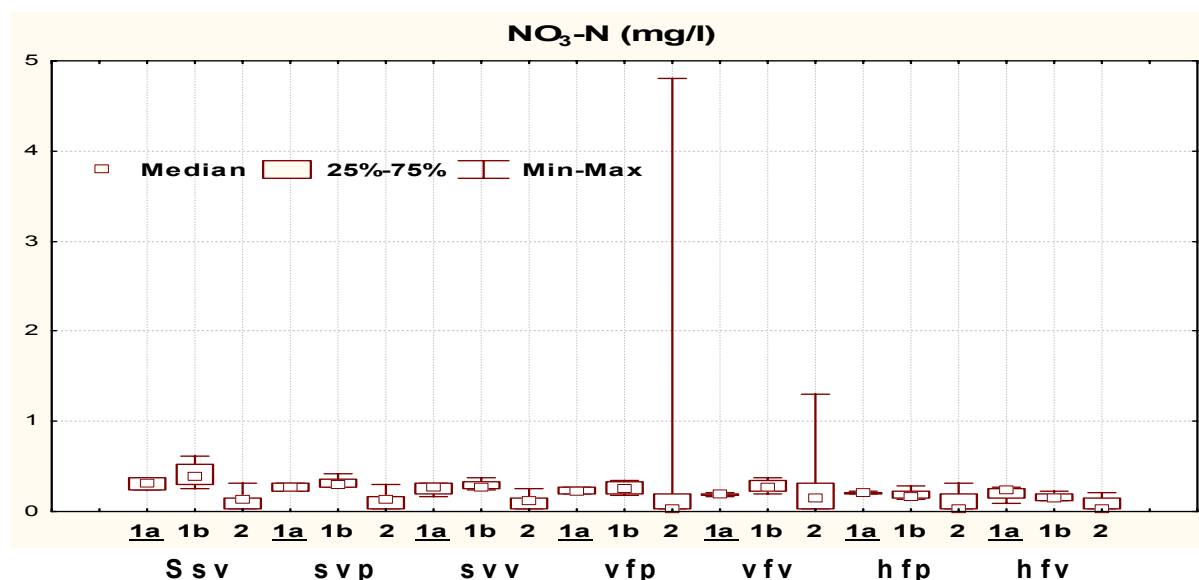


Рисунок 29. Концентрация NO₃-N (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

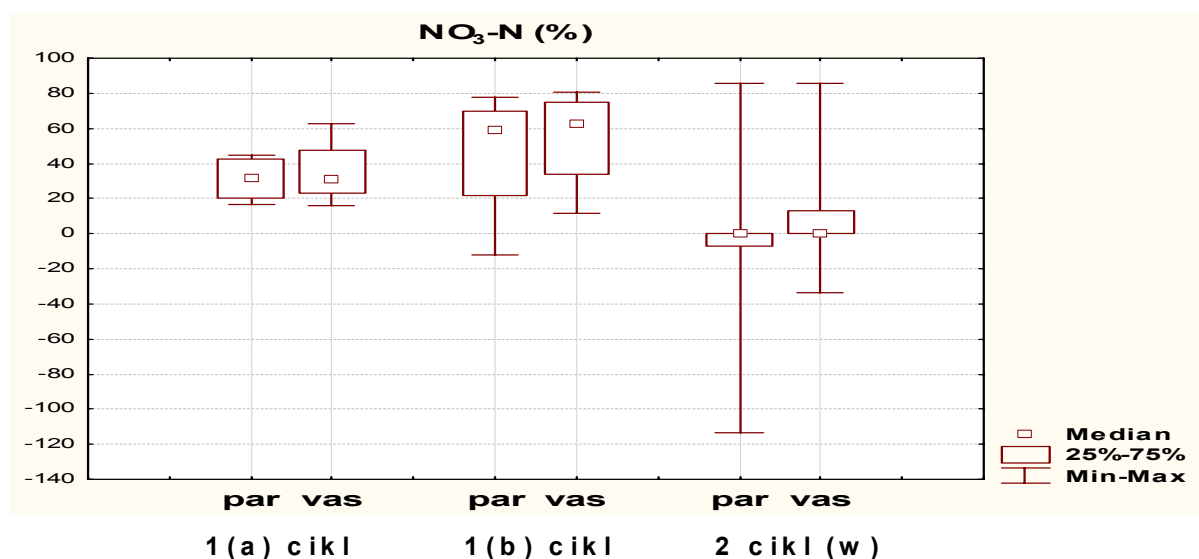


Рисунок 30. Эффективность очистки NO₃-N (%) в сторонах параллельных комбинированных систем (par)-правая и (vas)-левая почвенных фильтров в исследуемых циклах. Wilcoxon-тест указан как (w).

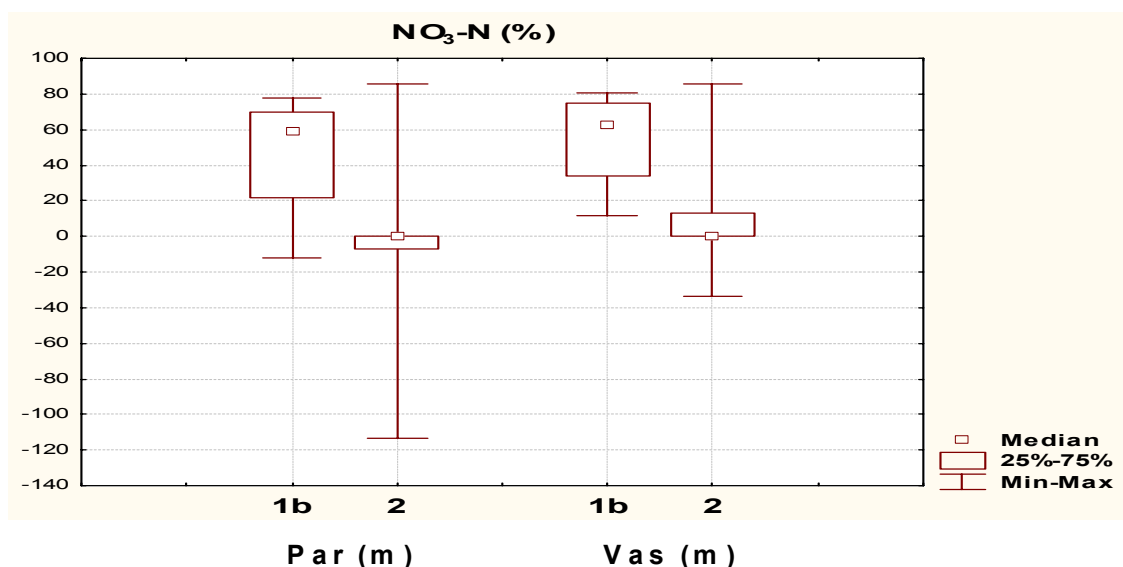


Рисунок 31. Сравнение эффективности очистки $\text{NO}_3\text{-N}$ (%) в двух временных циклах (1b и 2 цикле) в сторонах (par-правая, vas-левая) параллельных систем комбинированных почвенных фильтров. U-тест по Mann Whitne' показан как (m).

4.8. $\text{NO}_2\text{-N}$

Существенного эффекта очистки $\text{NO}_2\text{-N}$ и $\text{NO}_3\text{-N}$ в данном сооружении в анализируемый период, не достигли, однако частично оправдывает применение принципа предварительной нитрификации. Период отрицательных температур также непосредственно повлиял на результаты эффективности очистки этих показателей качества воды.

В графиках сравнения эффективности очистки между 1(б) и 2 циклами показателей качества воды каждой камеры отдельно, существенной разницы не обнаружено, их поместили в (дополнение 1).

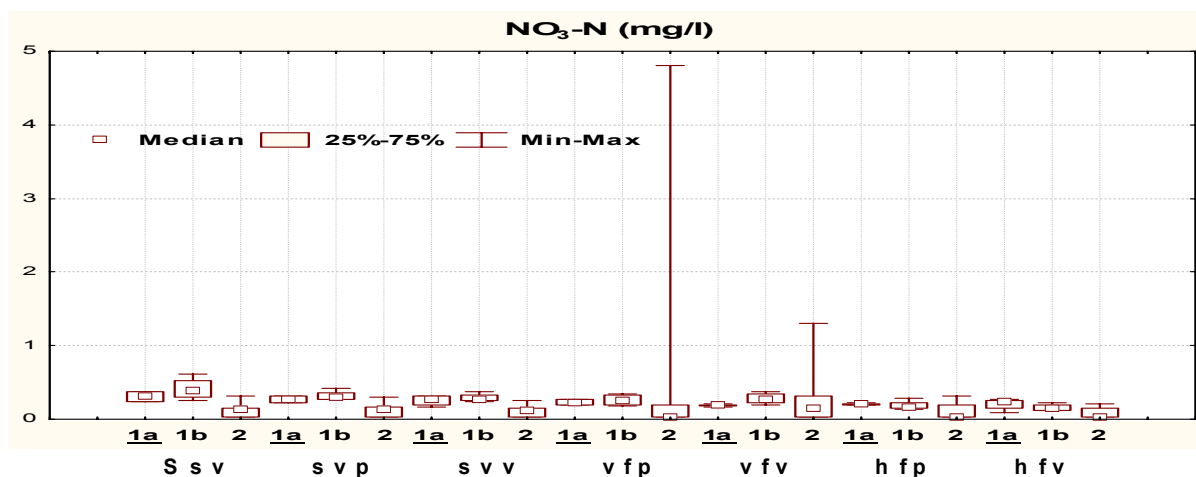


Рисунок 32. Концентрация $\text{NO}_2\text{-N}$ (мг/л), (ssv) – приток сточной воды, (svp) – правая сторона приточного колодца, (svv) – левая сторона приточного колодца, (vfp)- оттоки вертикального правого и вертикального левого (vfv) почвенных фильтров, (hfp) оттоки горизонтального правого и горизонтального левого (hfv) почвенных фильтров в 1(а), 1(б) и 2 временных циклах.

4.9. Сравнение эффективности очистки в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности.

На рисунке 33 в 1(б) цикле существенная разница между v_p и v_v почвенными фильтрами обусловлена заменой фильтрующего материала блочная крошка в 1(а) цикле, которая имела негативное влияние на очистку сооружения в целом, в связи с затоплением. После замены материала на известняковый щебень работа вертикальных фильтров нормализовалась, в особенности лучше проявилось в v_v почвенном фильтре.

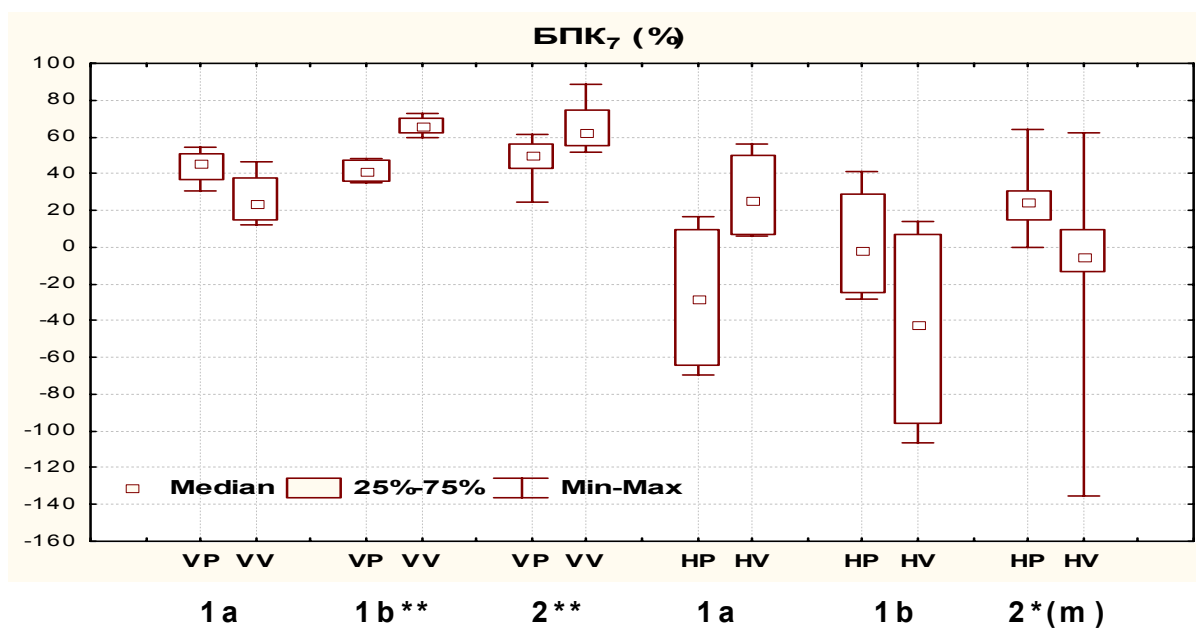


Рисунок 33. Сравнение эффективности очистки БПК₇ (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (v_p -правый и v_v -левый) и горизонтальных (h_p -правый и h_v -левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2 циклах Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как * для $p < 0,05$, ** для $p < 0,01$. Результаты анализов U-теста по Mann Whitney' показаны как (m).

В связи с уменьшением гидравлической нагрузки эффективность очистки во 2 цикле в вертикальных фильтрах повысилась. Однако, замечена существенная разница между v_p и v_v почвенными фильтрами. В период отрицательных температур v_v фильтр проявился лучше, благодаря большей рабочей поверхности, пористостью структуры и теплоудерживающим свойствам фильтрующего материала.

Во 2 цикле между h_p и h_v почвенными фильтрами существенная разница определяется тем, что в h_v фильтре практически не остается органического вещества, основная масса используется v_v почвенном фильтре, в правой стороне удаление органики в обоих фильтрах стабильней.

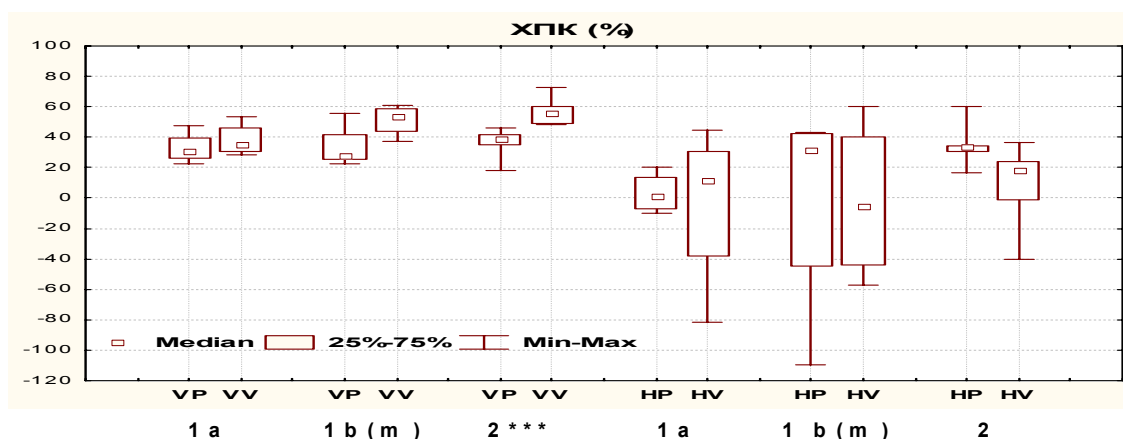


Рисунок 34. Сравнение эффективности очистки ХПК (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (vp-правый и vv-левый) и горизонтальных (hp-правый и hv-левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2 циклы. Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как * $p < 0,05$. Результаты анализов по U-тесту Mann Whitney' показаны как (m).

Существенную разницу между vp и vv почвенными фильтрами во 2 цикле можно объяснить уменьшением гидравлической нагрузки, хорошими физико-механическими свойствами фильтрующего материала облегченный керамзит, способствующий лучшему удалению ХПК.

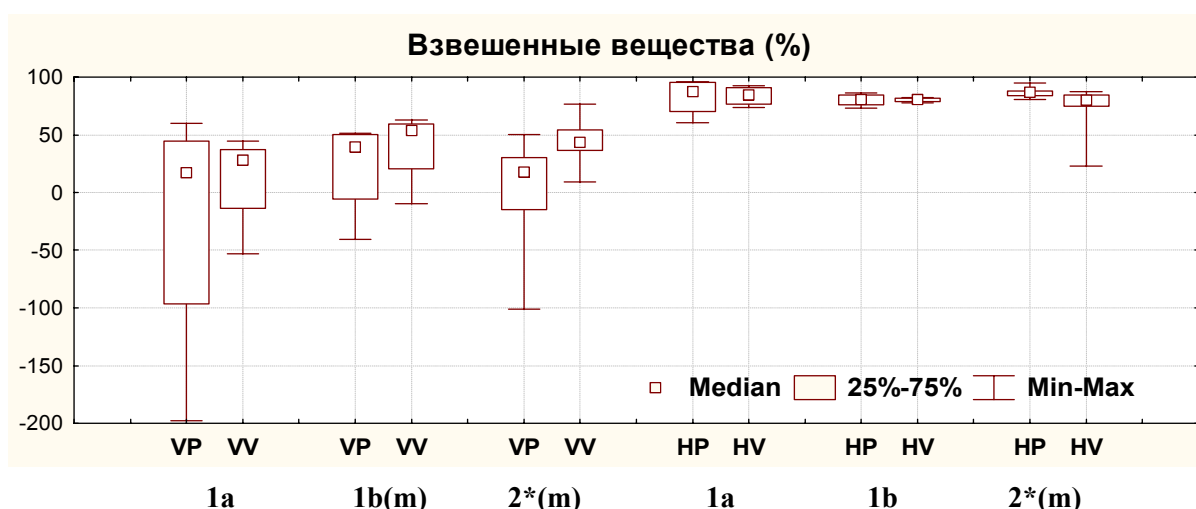


Рисунок 35. Сравнение эффективности очистки взвешенных веществ (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (vp-правый и vv-левый) и горизонтальных (hp-правый и hv-левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2 циклы. . Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как * $p < 0,05$. Результаты анализов по U-тесту Mann Whitney' показаны как (m).

На рисунке 35 показана существенная разница между vp и vv почвенными фильтрами во 2 цикле. Это объясняется отсутствием условий для усвоения (отделения) взвешенных веществ биопленкой под влиянием отрицательных температур и слабых теплоудерживающих свойств фильтрующего материала (известняковый щебень), а также из-за образования на поверхности почвенного фильтра ледовой корки, что

приводит к нарушению аэрационной способности фильтра. Легкий керамзит отличающийся тепло удерживающей способностью и пористостью, препятствует быстрому оттоку воды, и поступлению кислорода воздуха, тем самым значительно увеличивая эффективность очистки.

В горизонтальных почвенных фильтрах происходит наиболее активное удаление взвешенных веществ во всех циклах, однако есть существенная разница во 2 цикле, между h_p и h_v сторонами, возможно в результате влияния отрицательных температур и частичного замерзания системы, которая отражается на результатах анализа.

Рисунок 36 показывает существенное различие в 1 (б) и 2 циклах между h_p и h_v почвенными фильтрами. Лучшая адсорбционная способность проявилась в (гп) почвенном фильтре в обоих циклах, благодаря сочетанию комбинаций фильтрующих материалов – известнякового щебня, содержащего ионы Ca в u_p почвенном фильтре, и легкого керамзита, который стимулирует повышение адсорбционных процессов в следующем этапе очистки во всех циклах.

Уменьшение гидравлической нагрузки во 2 цикле повышает эффективность очистки незначительно.

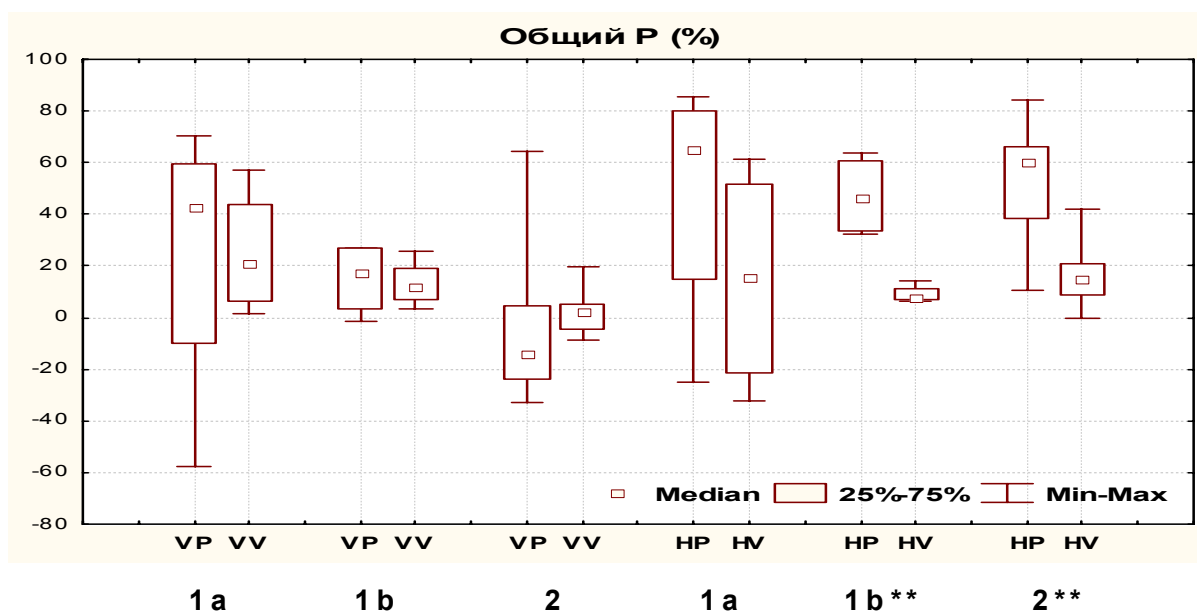


Рисунок 36. Сравнение эффективности очистки общего Р (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (v_p -правый и v_v -левый) и горизонтальных (h_p -правый и h_v -левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2. Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как** для $p < 0,01$.

На рисунке 37 в 1(б) цикле наблюдается существенная разница между v_p и v_v почвенными фильтрами. Это объясняется слабой усвояемой способностью общего N известняковым щебнем из-за его сравнительно небольшой площади поверхности усвоения и отсутствия водоудерживающих свойств фильтрующего материала.

Во 2 цикле отрицательные температуры оказывают заметное влияние на эффективность очистки в v_p почвенном фильтре, что подтверждает слабую теплоудерживающую и пропускную способность поверхности фильтрующего материала в процессе заледенения, а также уменьшение аэрационной возможности, приводящей к снижению процессов нитрификации.

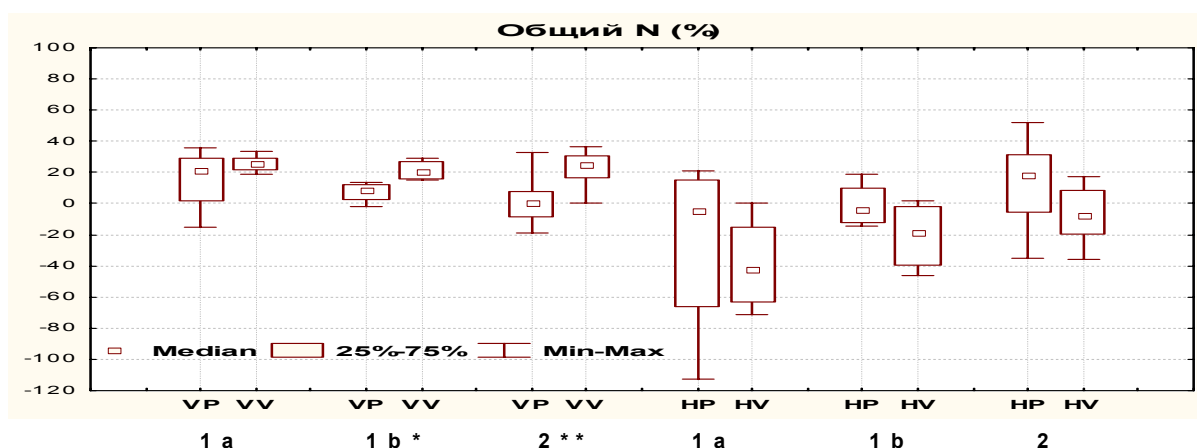


Рисунок 37. Сравнение эффективности очистки общего N (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (vp-правый и vv-левый) и горизонтальных (hp-правый и hv-левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2. Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как * для $p < 0,05$, ** для $p < 0,01$.

На рис. 38 наблюдается существенная разница в 2 цикле между vp и vv почвенными фильтрами. Во 2 цикле на эффективность очистки $\text{NH}_4\text{-N}$ в vv почвенном фильтре значительно повлияло уменьшение гидравлической нагрузки, а также положительные физико-химические свойства фильтрующего материала легкого керамзита. Принцип “предварительной денитрификации” лучше проявляется во всех временных циклах в vv почвенном фильтре.

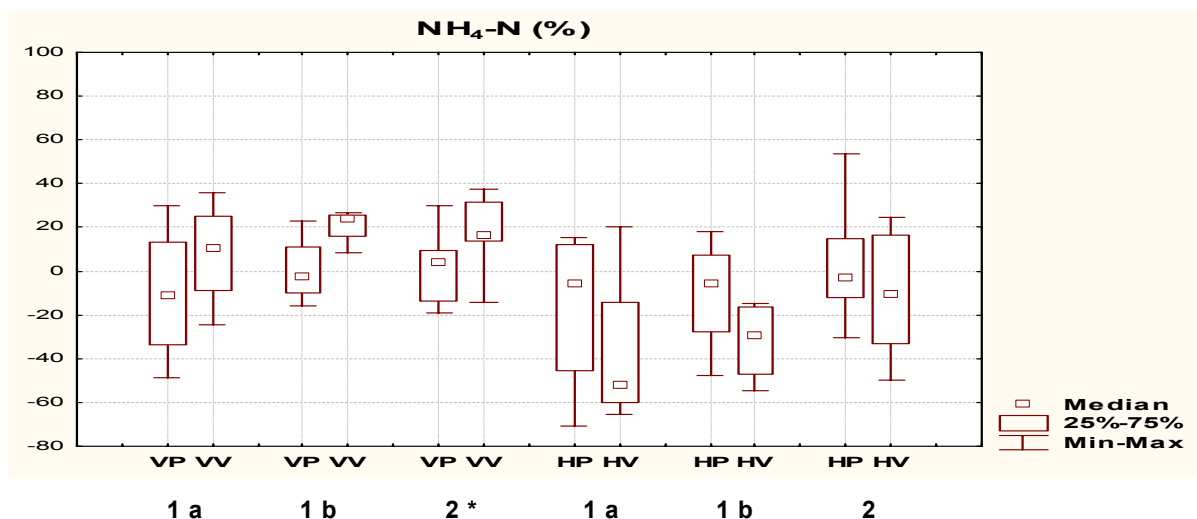


Рисунок 38. Сравнение эффективности очистки $\text{NH}_4\text{-N}$ (%) в сторонах параллельных систем почвенных фильтров по отдельности в вертикальных (vp-правый и vv-левый) и горизонтальных (hp-правый и hv-левый) почвенных фильтрах в исследуемых циклах 1(а), 1(б), 2. Существенная разница по т-тесту между сторонами показана как * $p < 0,05$.

Общая дискуссия

По сравнению с производственными фильтровальными сооружениями, в которых происходящие процессы контролируются легче, пилотные сооружения более зависимы от внутренних и внешних факторов среды. В анализе эффективности очистки пилотного сооружения в Нью пришли к следующим выводам:

При анализе эффективности очистки в зимний период по временным циклам улучшились показатели эффективности очистки органических, азотсодержащих веществ в 1(б) и 2 циклах. Это связано с уменьшением количества потока воды.

Сравнивая показатели эффективности очистки сторон почвенных фильтров, пришли к выводу, что эффективность очистки органических веществ, азотсодержащих соединений лучше в камерах с фильтрующим материалом из легкого керамзита (смотрите дополнение 3). Обладая хорошей теплоудерживающей способностью, данный материал обеспечивает стабильность работы, способствует повышению эффективности очистки в почвенных фильтрах в целом.

Уменьшение очистки, вызванное сильным влиянием отрицательных температур на вертикальные фильтры, незначительно компенсировалось работой горизонтальных почвенных фильтров, оправдывая тем самым преимущества комбинированных систем почвенных фильтров.(смотрите рисунки 7, 11, 15, 22)

Соорег (1996) указал, что денитрификация также строго зависит от температуры и протекает очень медленно при температурах ниже 5 С°, оптимальное значение pH для денитрификации находится в пределах 7 и 8, однако щелочь, создаваемая в процессе денитрификации, может спровоцировать повышение кислотности.

В исследовании нескольких канадских и северо -американских искусственных болотных систем выявили, что температурная разница в зимний период играет значимую роль в процессах аммонификации, нитрификации, и денитрификации. Поэтому коэффициент общего удаления азота может быть сильно зависим от температуры (Werker 2005).

Данные северо -американских водоочистных сооружений данного типа дают результаты широкого предела эффективности очистки органических веществ (50-90%), взвешенных веществ (40-94%), азотсодержащих (30-98%) и фосфорсодержащих (20-90%) веществ (Bastian and Hammer 1993).

Результатами анализов была оправдана рециркуляция (или принцип “предварительной денитрификации”) сточной воды. Возможно, лучшие результаты эффективности очистки проявятся в летний период.

Одной из возможностей повышения эффективности очистки, является увеличение интервала времени подачи воды. В данной работе интервал поступления воды составлял 2...3 часа (смотрите таблицу 1), Laber (2002) рекомендует, что для снабжения высоким уровнем кислорода очень важно нагрузить почвенный фильтр поочередно с интервалом минимум в 2...3 часа.

Сравнивая работу фильтрующих материалов, пришли к выводу, что легкий керамзит с его физико-механическими свойствами и с большей рабочей поверхностью, в эффективности очистки в зимний период основных параметров качества сточной воды, проявляет себя лучше, чем щебень. Особенно в удалении органических и азотсодержащих веществ, в комбинации с фильтрующими материалами левой стороны почвенных фильтров.

Фильтрующий материал известняковый щебень в вертикальном правом фильтре в комбинации с фильтрующим материалом легкий керамзит в горизонтальном правом почвенном фильтре дал неплохие результаты эффективности очистки удаления общего фосфора 67,1 %.

Мельцер (1995) заявил, что эффективность очистки также зависит от диаметра фракции загрузки, ее пористости и удельной площади поверхности фильтрующего материала.

С увеличением крупности фракции загрузочного материала уменьшается площадь рабочей поверхности для образования биопленки. Поэтому для повышения эффективности очистки следует идти по пути увеличения пористости загрузочного материала (Яковлев и др. 2004).

Анализируя эффективность очистки в зимний период, мы столкнулись с факторами замены фильтрующего материала, гидравлической нагрузки, продолжительности контакта сточной воды с биопленкой, температуры внешней среды и количества воздуха, поступающего в тело почвенного фильтра - все это сильно отражается на результатах эффективности очистки.

Обобщение

В данной работе сравнивались два комбинированных почвенных фильтра и состав фильтрующих материалов испытательного водоочистного сооружения, находящегося в Южной Эстонии в поселке Нью. Анализировались статистически важные изменения средних показателей эффективности очистки сточной воды (%) между циклами и сторонами.

Вычислены средние значения концентраций веществ (мг/л) и их изменения в результате влияния процесса очистки.

В удалении фосфорсодержащих соединений преимущество имел фильтрующий материал известняковый щебень. Легкий керамзит по своим физико-химическим свойствам проявил универсальность в удалении органики и азотсодержащих веществ.

Анализ эффективности очистки правой и левой сторонами выявил преимущества левой стороны почвенных фильтров. В качестве фильтрующего материала в левой стороне обоих фильтров – как горизонтального, так и вертикального – использовали легкий керамзит. Его преимуществом является большая рабочая поверхность и хорошие теплоудерживающие свойства. Также легкий керамзит хорошо проявил себя в минерализации и последующем удалении органических веществ, в том числе и азотсодержащих веществ.

В удалении фосфорных соединений в зимний период хорошо проявила себя комбинация фильтрующих материалов из легкого гравия в горизонтальном почвенном фильтре и известнякового щебня в вертикальном почвенном фильтре. Однако в удалении азотсодержащих соединений и органических веществ эта комбинация оказалась менее эффективна.

В очистке сточных вод в зимний период универсальную эффективность проявил фильтрующий материал легкий керамзит, который можно рекомендовать в дальнейшее изучение и применение в производство по очистке сточных вод.

Üldkokkuvõte

Antud töös on võrreldud kahte kombineeritud heitveepuhastus-pinnasfiltrit ja filtreerivate materjalite koostist Lõuna-Eestis asuvas Nõo tehismärgalapuhasti katsesüsteemis. On analüüsitud eksperimentaalsete tsüklite ja kahekambriliste paralleelsete vertikaal- ning horisontaalvooluliste filtreite erinevate poolte vahelisi heitvee puhastusefektiivsuste keskmiste väärtuste statistiliselt olulisi muutusi.

On välja arvatud ainekontsentratsioonide keskvaärtused ja nende muutused puhastusprotsessi mõjul.

Fosforit sisaldavate ainete eemaldamisel osutus efektiivseks filtreerivaks materjaliks lubjakivikillustik. Kergkruus filtreeriva materjalina oli oma füüsikalise-keemiliste omaduste poolest universaalne orgaaniliste ainete ja lämmastiku sisaldavate ainete eemaldamisel.

Parema ja vasaku poole puhastusefektiivsuse analüüs tõi välja pinnasfiltrite vasaku poole paremuse. Filtreeriva materjalina oli vasakus pooles nii vertikaal- kui horisontaalfiltris kasutatud kergkruusa. Selle eeliseks on suur eripind ja materjali hea soojapidavus. Samuti oli kergkruus efektiivsem orgaanika mineraliseerimisel ja eemaldamisel, sealhulgas ka lämmastikuühendite eemaldamisel.

Talveperioodil fosforiühendite eemaldamisel osutus heaks filtreerivate materjalide kombinatsiooniks lubjakivikillustik vertikaalvoolulises pinnasfiltris ja kergkruus horisontaalvoolulises pinnasfiltris. Lämmastikku sisaldavate ja orgaaniliste ainete eemaldamisel oli see kombinatsioon vähem efektiivne.

Heitvee puhastamisel talveperioodil osutus universaalselt efektiivseks materjaliks kergkruus, seda võib soovitada uurida edaspidi ning rakendada heitvee puhastuses.

Список использованной литературы

1. Вавилин, В. А., Васильев, В. Б., Рытов, С.В. (1993). Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов. М., Наука, 208 стр.
2. Кедров В. С. и др. Водоснабжение и водоотведение: Учебник для вузов.- М.; Стройиздат, 2002.-336 с.
3. Мельцер В. З. 1995. Фильтровальные сооружения в коммунальном водоснабжении. М., Стройиздат, 176 стр.
4. Яковлев, С. В., Воронов, Ю. В. 2004. Водоотведение и очистка сточных вод. Учебник для вузов. М., АСВ, 704 стр.
5. Bastian, R. K. and Hammer, D.A. (1993). The use of constructed wetlands for wastewater treatment and recycling. In: G. A. Moshiri, Editor, Constructed wetlands for Water Quality Improvement, Lewis Publishers, Ann Arbor, 59-68.
6. Cooper, P., Griffin, P., Humphries, S., Pound, A (1999). Design of a hybrid reed bed system to achieve complete nitrification and denitrification of domestic sewage. Water Science and Technology, 40 (3), 283-289.
7. Jennsen P.D. & Krogstad, T. 2003. Design of constructed wetlands using phosphorus sorbing Lightweight aggregate (LWA). In: Mander, Ü., Jennsen P.D. (Eds.) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in cold climates, Advantages in Ecological Science Vol. 11, WIT Press, Southampton, Boston, pp 259-272.
8. Kadlec, R. H. and Knight, R. L. (1996). Treatment Wetlands. Lewis Publishers: Boca Raton, New York, London, Tokio, 893 p.
9. Laber, J., Haberl, R & Perfler, R. (2002). Enhanced nitrogen elimination in vertical – flow in cold climates. In Mander, Ü & Jenssen, P. (Eds), Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates. Advantages in Ecological Science, 11, Wit Press, Southampton, Boston, pp 107-114.
10. Mahlum, T., Jenssen, P. D. & Warner, W. S. Cold-climate constructed wetlands. *Wat. Sci. Tech.*, 32, 95-101, 1995.
11. Mander, Ü., Kuusemets, V., Lõhmus, K., Mäuring, T., Teiter, S. & Augustin, J. Nitrous oxide, dinitrogen, and methane emission in a subsurface flow constructed wetland. *Wat.Sci.Tech.*, 2003, (In press)
12. Masing, V. 1992. Ökoloogia Leksikon Tln.: Eesti Entsüklopeediakirjastus, 320 lk., ill.
13. Noorvee, A, Põldvere, E, Mäuring, T., Mander, Ü. (2003). Tehismärgalade aeratsioonivõime Kodijärve ja Kõo reoveepuhastite näitel. Frey, T. (Toim.) Kaasaegse ökoloogia probleemid, Eesti Ökoloogia konverentsi lühiartiklid, Tartu, lk 151-158.
14. Noorvee, A. (2003) Puhastusprotsessid Kodijärve vertikaalvoolulises pinnasfiltris. Magistritöö keskkonnatehnoloogia erialal. Geograafia Instituut, Tartu Ülikool, 58 lk.

5. Tchobanoglous, G., Burton F. L., Stensel H. D. (2003). Wastewater Engineering : treatment and reuse / Metcalf & Eddy, Inc. - 4th ed., 1819 p.
16. Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Haberl, R., Perfler, R & Laber, J. (1998). Removal mechanisms and types of constructed wetlands. In: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P. F., Green, M. D. & Haberl, R. (Eds.) Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Europe. Backhuys Publishers:Leiden, pp 17-192
17. Von Felde, K. & Kunst, S. (1997). N- and COD- removal in vertical-flow systems. Water Science and Technology, 35 (5), 79-85.
18. Werker A. G., Dougherty, J. M. (2005). Treatment variability for Wetland wastewater treatment design in cold climates. Water Science and Technology, 35 (5).
19. Wittgen H. B. and Maehlum T. (1997). Wastewater treatment wetlands in cold climates. Water Science and Technology, 35 (5) pp.45-53.

Интернетные источники:

- 1.Http: // www.maxit.ee. (03.06.2006)
- 2.Http: // www.Glossary.ru /. (02.03.2006).

Дополнения

Дополнение 1

Рисунок 1

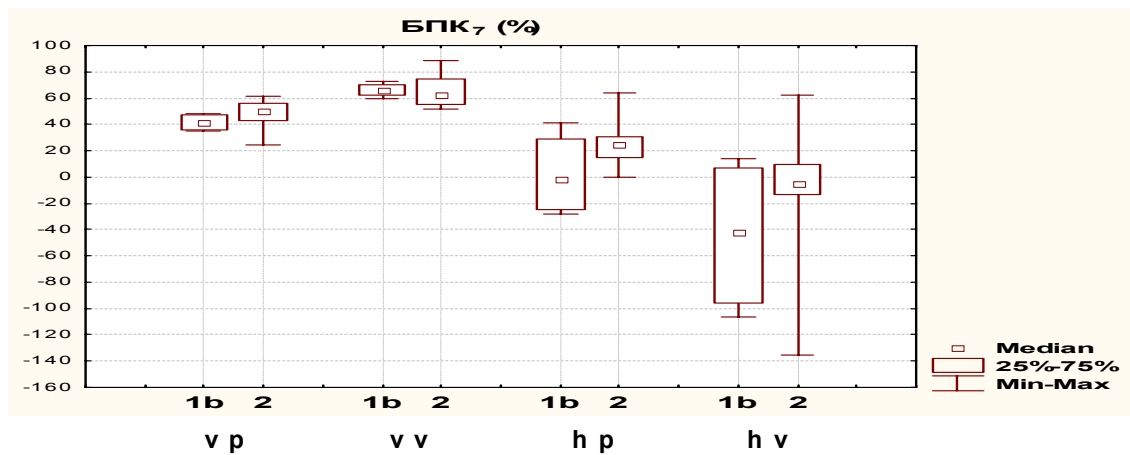


Рисунок 2

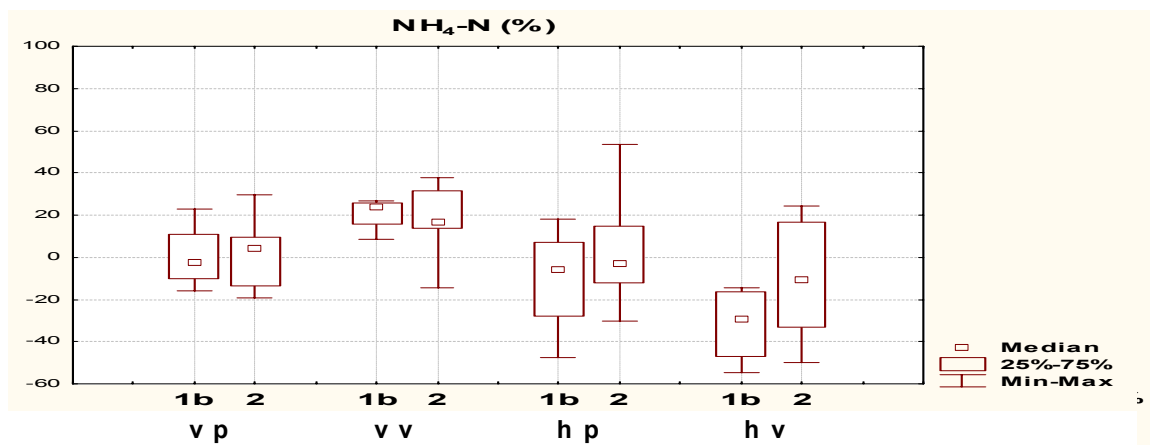


Рисунок 3

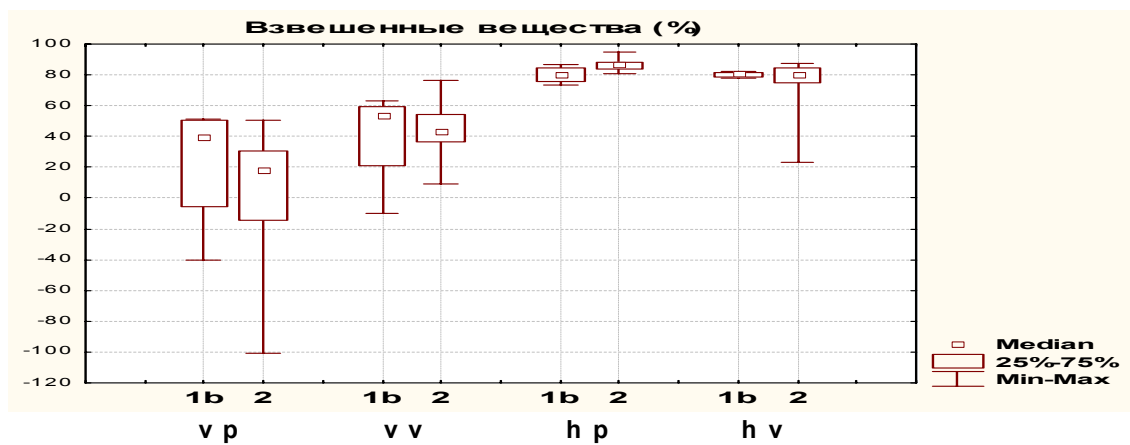


Рисунок 4

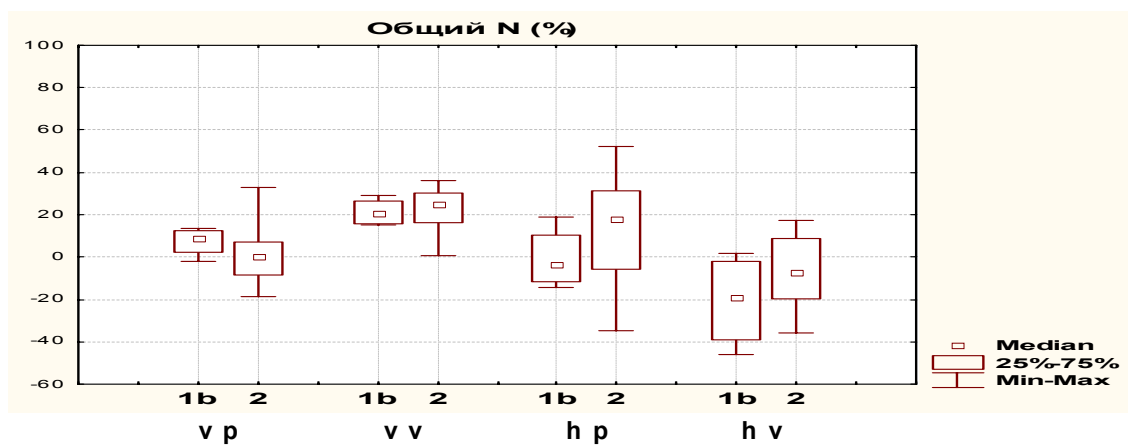


Рисунок 5

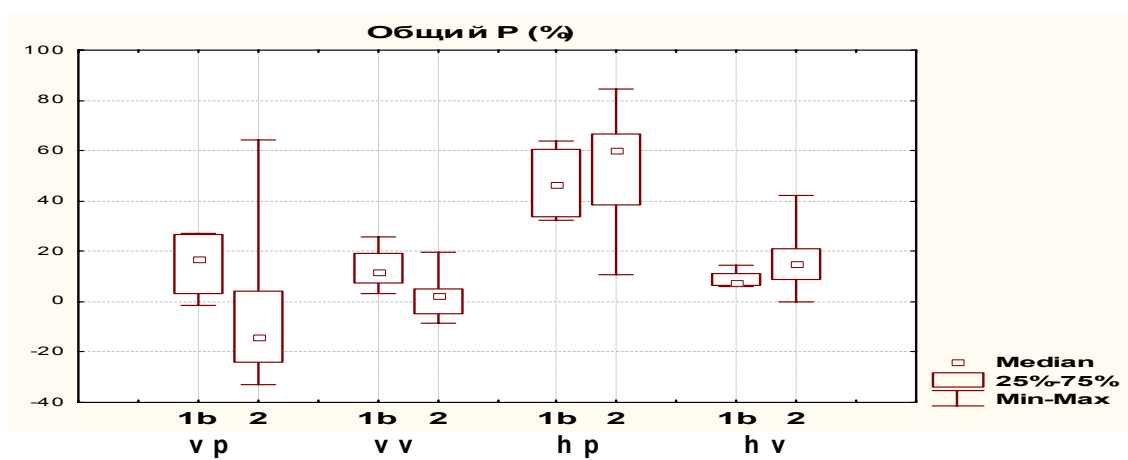
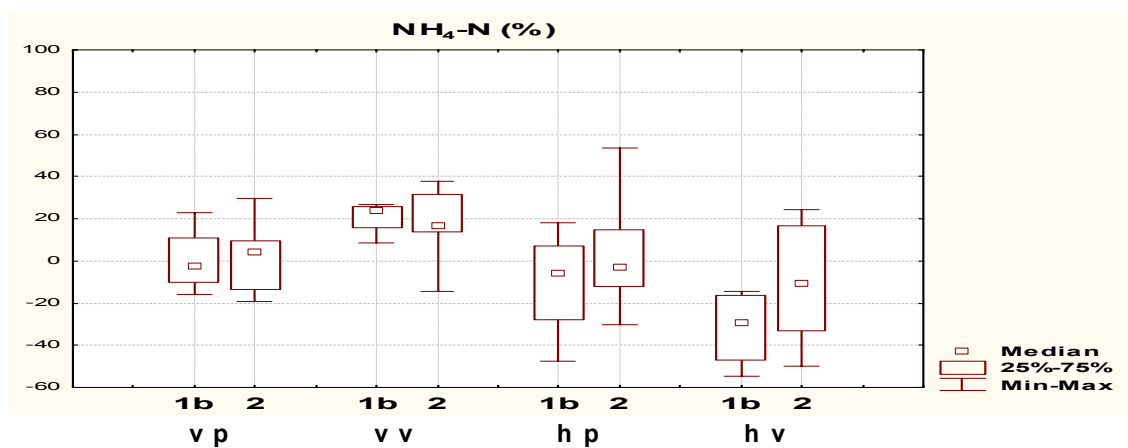


Рисунок 6

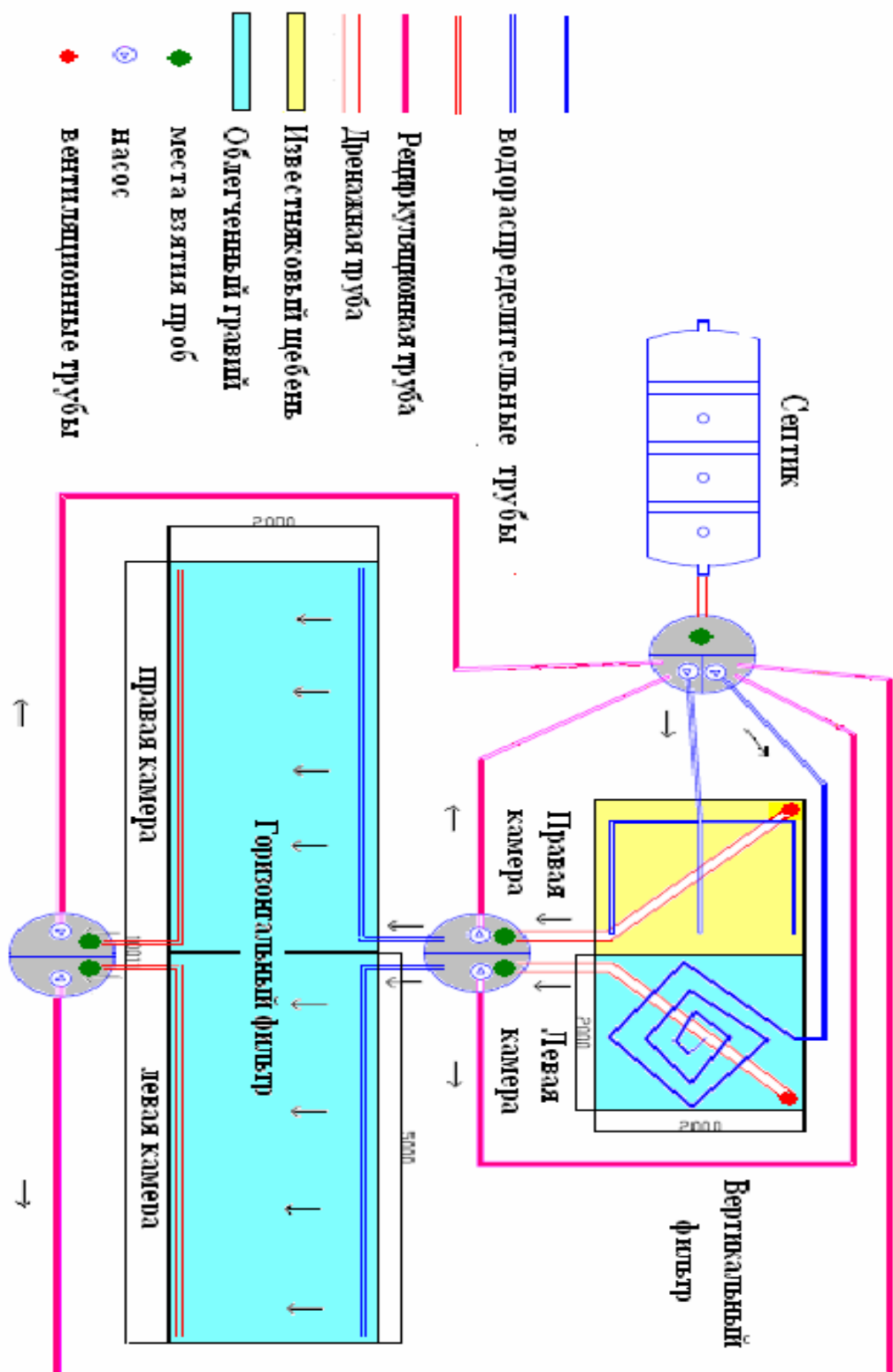


Дополнение 2. Сравнение средних концентраций показателей качества воды (мг/л)

Индикаторы качества воды	Циклы	ssv	svp	svv	vfp	vfv	hfp	hfv
БПК ₇ (мг/л)	1а цикл	330,50	265,57	221,13	150,50	157,75	179,00	111,75
	1б цикл	405,00	308,04	269,25	177,50	91,00	178,75	133,50
	2 цикл	413,89	280,79	248,83	148,67	86,89	103,33	83,78
Общий фосфор (мг/л)	1а цикл	21,50	13,69	15,16	10,55	11,50	3,28	8,83
	1б цикл	20,00	14,21	16,50	12,00	14,25	6,50	13,00
	2 цикл	21,52	15,28	18,03	16,23	17,67	6,97	14,53
Азот (мг/л)	1а цикл	79,50	76,39	79,38	63,50	59,50	72,25	79,25
	1б цикл	65,50	62,07	61,88	57,50	48,75	57,50	58,25
	2 цикл	72,44	63,92	60,33	62,00	47,56	52,56	48,22
NH ₄ -N (мг/л)	1а цикл	43,00	50,07	53,63	54,50	50,00	59,50	64,25
	1б цикл	50,00	52,36	52,00	51,75	40,75	55,50	54,00
	2 цикл	52,89	49,60	46,28	49,33	37,78	45,22	39,67
N-NO ₂ (мг/л)	1б цикл	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00
	2 цикл	0,00	0,03	0,00	0,02	0,11	0,08	0,00
N-NO ₃ (мг/л)	1а цикл	0,31	0,27	0,26	0,23	0,19	0,21	0,21
	1б цикл	0,42	0,32	0,29	0,26	0,28	0,19	0,16
	2 цикл	0,12	0,12	0,11	0,63	0,36	0,12	0,09
Взвеш-ые вещества (мг/л)	1а цикл	100,75	60,57	53,38	64,50	42,50	7,00	6,00
	1б цикл	132,50	80,43	70,13	59,50	40,50	11,00	7,75
	2 цикл	116,22	69,53	62,86	63,78	32,78	7,28	9,50
ХПК (мг/л)	1а цикл	681,00	533,14	484,13	355,25	301,00	336,00	287,25
	1б цикл	690,00	537,86	447,50	342,50	217,50	335,00	205,00
	2 цикл	745,44	513,49	459,78	326,00	201,78	204,22	174,11

Дополнение 3 Общий вид испытательного сооружения

Вид сверху комбинированного испытательного сооружения в Нью



Дополнение 4

Показатели качества воды	Временные циклы	Средние значения и стандартные отклонения (%)			
		vp	vv	hp	hv
БПК	1(б) цикл	41,59±7,11	66,40±5,44	2,00±32,91	-44,31±60,0
	2 цикл	47,89±11,09	65,91±14,26	26,41	-21,59±63,6
ХПК	1(б) цикл	33,60±14,90	51,30±10,27	-1,00±73,03	-1,89±52,21
	2 цикл	37,17±8,20	56,37±8,34	34,83±12,19	9,96±23,56
Взвешенные вещества	1(б) цикл	22,58±43,08	40,16±33,66	80,11±5,64	80,36±1,94
	2 цикл	6,54±46,71	44,68±19,15	86,96±5,09	73,99±19,87 2
Общий Р	1(б) цикл	14,95±14,10	13,19±9,25	47,16±15,96	8,84±3,68
	2 цикл	-2,74±30,58	2,18±9,40	53,35±23,59	17,05±14,50
Общий N	1(б) цикл	7,38±6,78	21,24±6,57	-0,80±14,66	-20,49±22,4
	2 цикл	1,45±15,93	22,66±10,74	12,07±26,60	-6,10±19,97
NH4-N	1(б) цикл	0,46±16,35	20,77±8,36	-10,28±,35	-31,90±18,7
	2 цикл	0,97±15,96	18,81±15,45	3,34±25,65	-10,56±28,4
NO2-N	1(б) цикл	32,76±61,23	49,03±46,95	-139,±440,4	-63,1±225,0
	2 цикл	-1436±4198	-1001±2101	-3935±992,	36,87±48,19
NO3-N	1(б) цикл	16,88±19,45	1,04±26,87	19,83±51,79	38,53±28,63
	2 цикл	-181±514,5	-228,1±394	3,34±60,69	27,45±46,82

Дополнение 5.

Параметры	Вертикальный фильтр в циклах			Горизонтальный фильтр в циклах		
	В-1а	В-1б	В-2	Г-1а	Г-1б	Г-2
БПК par (%)	43,76 ±10	41,59 ±7	47,8 ±11	-27,4 ±43	2,0±32,91	26 ±18,8
БПК vas (%)	26,28 ±15	66,40 ±5	65,91±14	28,2 ±25	-44,31 ±60	-21 ±63
ХПК par (%)	32,82 ±10	33,60 ±14	37,17 ±8	3,33 ±13	-1,00 ±73	34,83±12,1
ХПК vas (%)	38,15 ±10	51,30 ±10,	56,37 ±8	-3,69 ±54	-1,89 ±52	9,96 ±23,5
Взвешенные вещества par (%)	-25,9 ±11	22,58±43,0	6,54 ±46	82,88±16	80,11 ±5,6	86,96±5,09
Взвешенные вещества vas (%)	11,73 ±44	40,16 ±33	44,6 ±19	83,74 ±8	80,36±1,94	73,99±19,8
Общий Р par (%)	24,65 ±56	14,95 ±1	-2,74 ±30	47,58±50	47,16±15,9	53,3 ±23,5
Общий Р vas (%)	25,21 ±24	13,19 ±9	2,18 ±9,4	14,94±43	8,8 ±3,684	17,05±14,5
Общий N par (%)	15,36 ±21	7,38 ±6	1,45 ±15	-25,32 ±6	-0,80 ±14	12,0 ±26,6
Общий N vas (%)	25,62 ±5,9	21,24 ±6	22,6 ±10	-39,2 ±31	-20,49 ±22	-6,10±19,9
NH4-N par (%)	-10,1 ±32	0,46 ±16	0,97 ±15	-16,8 ±39	-10,28 ±27	3,34 ±25,6
NH4-N vas (%)	8,26 ±24	20,77 ±8	18,8 ±15	-37,1 ±38	-31,90 ±18	-10,56 ±28
NO2-N par (%)	0,00 ±0,0	32,76 ±61	-143 ±41	0,0 ±0,0	-139 ±440	-3935 ±99
NO2-N vas (%)	0,00 ±0,00	49,03 ±46	-10014±2	0,0 ±0,0	-63,14±22	36,8 ±48,1
NO3-N par (%)	13,19 ±2,6	16,8 ±19	-181 ±51	9,1 ±12,4	19,83±51,7	3,3 ±60,6
NO3-N% vas	23,18 ±19	1,04 ±26	<u>-228 ±39</u>	<u>-7,21±37</u>	38,53±28,6	<u>27,4 ±46,8</u>