

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО МЕТЕОРОЛОГИЯ И ХИДРОЛОГИЯ

Албена Иванова Ватралова

**ОЦЕНКА НА ТЕХНОЛОГИЧНАТА ЕФЕКТИВНОСТ
НА ФИЛТЪРНИ СИСТЕМИ ЗА ДОПРЕЧИСТВАНЕ
НА ГРАДСКИ ОТПАДЪЧНИ ВОДИ**

АВТОРЕФЕРАТ

на

ДИСЕРТАЦИЯ

за присъждане на научна и образователна степен „ДОКТОР”

*Област на висше образование: 5. Технически науки
Професионално направление: 5.7. Архитектура, строителство и геодезия
(Инженерна хидрология, хидравлика и водно стопанство)*

Научен ръководител:

проф. д.т.н. инж. Петър Д. Игнатов

София, 2015

Благодарности

Авторката благодари на следните организации за съдействието, материалната и финансовата подкрепа при осъществяване на физическите експерименти и теоретичната разработка по разглежданата тема: Българска академия на науките, Национален фонд «Научни изследвания», Британски съвет (във Великобритания и представителство в България), University College London, Thames Water Plc. (Великобритания), Софийска пречиствателна станция за отпадъчни води - Кубратово, Пречиствателна станция за отпадъчните води на гр. Рединг (Великобритания).

Дисертационният труд е с обем 149 страници, вкл. 36 фигури и 38 таблици¹. Състои се от заглавна страница, съдържание, списък на фигурите, списък на таблиците, увод, изложение в седем глави, обобщение на резултатите в глава 8, описание на приносите в глава 9 и библиография със 175 заглавия на литературни източници, от които 84 на кирилица и 91 на латиница.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен семинар в департамент „Управление и използване на водите” към НИМХ-БАН, проведен на 18.12.2014 г.

Състав на научното жури:

- 1) доц. д-р инж. Ирена Илчева - ДУИВ, НИМХ-БАН
- 2) проф. д.т.н. инж. Румен Арсов – ХТФ, УАСГ
- 3) доц. д-р инж. Ирина Костова – ХТФ, УАСГ
- 4) доц. д-р инж. Драган Драганов – ХТФ, УАСГ
- 5) доц. д-р хим. Григор Михайлов – ХТФ, УАСГ

Защитата на дисертационния труд ще се състои на 27.4.2015 г. от 14 ч. в залата на Учебния център на НИМХ-БАН, бул. „Цариградско шосе” № 66, София.

¹ Номерата на фигурите, таблиците и формулите в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Съдържание

Увод	5
1. Предмет, обща цел на изследванията и актуалност на тематиката	5
2. Преглед и анализ на литературата по темата	7
2.1. Допречистване на градски отпадъчни води чрез третични бързи филтри	
2.2. Пречистване и допречистване от азот на градски отпадъчни води с потопени биологични филтри	
2.3. Изследователски подходи, прилагани в световната практика	
3. Специфични цели и задачи на изследванията в дисертационния труд	9
4. Методика за статистически анализ на експерименталните данни	10
5. Оценка на ефективността на бързи гравитационни филтри за третично пречистване на градски отпадъчни води	14
5.1. Материали и методи	
5.2. Резултати и обсъждане	16
5.2.1. Ефект на допречистване по НВ и БПК ₅	
5.2.2. Относителна задържаща способност K_v	18
5.2.3. Относителна загуба на напор h_v	19
5.3. Обобщение и изводи за технологичната ефективност на третичните филтри	20
6. Оценка на ефективността на потопени аерирани биологични филтри за нитрификация във второто стъпало на градска ПСОВ	21
6.1. Материали и методи	
6.2. Резултати и обсъждане	22
6.2.1. Първа група експерименти (степен на аерация I)	
6.2.2. Втора група експерименти (степен на аерация II)	28
6.2.3. Сравняване на резултатите от двете групи експерименти	30
6.2.4. Регресионен анализ	31
6.3. Обобщение и изводи за технологичната ефективност на потопени аерирани биологични филтри за нитрификация	32
7. Оценка на ефективността на потопени биологични филтри за отстраняване на азота чрез нитрификация и денитрификация след първото стъпало на градска ПСОВ	34
7.1. Материали и методи	
7.2. Резултати и обсъждане	35
7.2.1. Действие на системата за нитрификация-денитрификация	
7.2.2. Сравнение между технологичните ефективности на нитрификатора като самостоятелен реактор и в комбинация с денитрификатор	40
7.2.3. Сравнение между технологичните ефективности на третичния двуслоен бърз филтър и нитрификационния филтър в двустепенната схема за допречистване от азот	42
7.3. Изводи от изследванията при двустепенна схема с потопени биологични филтри за отстраняване на азота	43
8. Обобщение на резултатите от извършените научни изследвания	44
9. Научни и научно-приложни приноси на дисертационния труд	45
Списък на публикациите, свързани с дисертационния труд	46

Списък на съкращенията и означенията

БПК	–	биохимично потребен кислород
ВН	–	високо натоварване
ДБФ	–	двуслоен бърз филтър
ЕС	–	Европейски съюз
е.ж.	–	еквивалентни жители
НВ	–	неразтворени вещества
НН	–	ниско натоварване
ПАБФ	–	потопен аериран биологичен филтър
ПСОВ	–	пречиствателна станция за отпадъчни води
ПУРБ	–	планове за управление на речни басейни
СПСОВ	–	Софийска пречиствателна станция за отпадъчни води
ХПК	–	химично потребен кислород
$N_{\text{общ}}$, N	–	общ азот
NH_4-N	–	амониев азот
NO_x-N	–	окислен азот
NO_2-N	–	нитритен азот
NO_3-N	–	нитратен азот
$d_{\min}$ и $d_{\max}$	–	минимален и максимален диаметър на зърната във филтърния пълнеж;
d_{10}	–	ефективен диаметър (за 10% от масата на пробата);
d_{60} и d_{80}	–	диаметри на отворите на сита, през които биха преминали съответно 60% и 80% от масата на пробата;
k_1 и k_2	–	коефициенти на нееднородност: $k_1=d_{80}/d_{10}$; $k_2=d_{60}/d_{10}$;
d_{eq}	–	диаметър, който биха имали зърната, ако пробата беше еднородна:
		$d_{eq} = 100 / \sum \frac{P_i}{d_i} ;$
P_i	–	масата на зърната в % от общата маса, останали върху сито с диаметър на отворите d_i в mm.
n	–	големина на извадката (брой случаи)
R_j , $R(x_i)$	–	рангове на извадката
$\bar{s}$, $\bar{s}_1$, $\bar{s}_2$	–	извадково стандартно отклонение (неизместена оценка)
$\bar{x}$, $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$	–	средни аритметични величини на съвкупност (извадка) от опитни данни

УВОД

Все по-острата необходимост за опазване на водните ресурси от замърсяване и тяхното рационално използване налагат повишаване на степента на пречистване на отпадъчните води от населените места с прилагане на методи и процеси, допълващи или заместващи традиционните схеми. У нас за тези случаи могат да се срещнат термините допречистване, допълнително пречистване, третично пречистване, дълбоко пречистване.

В зависимост от избраната схема допречистването може да бъде комбинирано с класическите процеси във второто (биологичното) стъпало на селищната пречиствателна станция или да представлява отделно трето стъпало. Пример за последното е допречистване чрез бързи гравитационни филтри след второто (биологично) стъпало на пречиствателната станция за отпадъчни води (ПСОВ). Основната роля на третичната филтрация е да се отстранят остатъчните неразтворени, предимно органични, вещества в отпадъчните води. Тя е обект на първата част от технологичните изследвания в настоящия дисертационен труд, описана в Глава 5.

През последните 30 години възникна необходимост от допълнително снижаване не само на органичната материя, но и на биогенните елементи (азот и фосфор). Някои нови технологични схеми за отстраняването на азота са възприети вече в редица европейски градове, като напр. биологичната нитрификация-денитрификация в свободен обем в реактори с активна утайка. Не толкова популярни са т.нар. потопени реактори с прикрепена биомаса, разположени във второто стъпало на технологичната схема за пречистване на градски отпадъчни води. Тези съоръжения приличат конструктивно на третичните бързи филтри и в западната литература се срещат и с наименованията „потопени биологични филтри“, „биологични аерирани филтри“ и др., защото комбинират филтрирането на неразтворените вещества с отстраняването на разтворените органични вещества и азота посредством биологична нитрификация-денитрификация. Този тип филтърни системи са обект на другата част от технологичните изследвания в настоящия дисертационен труд, описана в Глави 6 и 7.

Специално внимание е отредено и на теоретичния анализ на данните и резултатите от практическите изследвания, който е извършен с подбрани методи на математическата статистика. Приложената аналитична методика и алгоритъмът ѝ са описани в Глава 4.

Нетрадиционните технологии са все още в процес на развитие. Сложният състав на градските отпадъчни води и не докрай изясненият механизъм на физико-химичните и биологичните процеси при тяхното пречистване обуславят липсата на еднозначни решения на научно-техническите проблеми в тази област. Това подтиква осъществяването на изследванията, описани в дисертационния труд.

1. ПРЕДМЕТ, ОБЩА ЦЕЛ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА И АКТУАЛНОСТ НА ТЕМАТИКАТА

1.1. Предмет и обща цел на изследванията

Предмет на изследванията в дисертационния труд са:

(1) практически методи за допречистване на отпадъчни води по определени показатели посредством филтърни системи с минерални пълнежи, поставени след първото и след второто стъпало на градски пречиствателни станции;

(2) теоретични методи за обработка и анализ на данните от практическите изследвания, включващи и критерии за сравнителна оценка на действието на съоръженията.

Обща цел на изследванията в дисертационния труд е да се направи оценка на технологичната ефективност на различни типове филтърни системи с минерални пълнежи при пречистване/допречистване на градски отпадъчни води от неразтворени и разтворени въглеродни и азотсъдържащи замърсители, и оптимизиране на някои технологични параметри.

1.2. Актуалност на дисертационната тематика

Основните фактори, влияещи върху развитието и прилагането на най-добрите налични технологии при пречистването на отпадъчните води, са нормативните актове за опазване на чистотата на природните води, от една страна, и климатичните промени и недостига на вода, от друга.

Във връзка с горните фактори актуалността на дисертационната тематика се определя в следните аспекти:

1) необходимостта да бъдат изпълнени изискванията на Рамковата директива за водите (РДВ) и хармонизираните с нея български нормативни документи за осигуряване на добро екологично състояние на повърхностните и подземните води до 2015 година;

2) климатичните промени, които трябва да бъдат отчетени в новите Планове за управление на речни басейни (ПУРБ) за периода 2016-2021 г. и в предстоящите за разработване Планове за управление при недостиг на вода и засушаване;

3) избрания район за част от изследванията – София, в който климатичните промени влияят пряко върху мерките за управление на водите.

По отношение на първия аспект оценката на екологичното състояние на повърхностните водни тела в една високо развита страна, като Германия показва, че почти 90 % от тях не постигат добро екологично състояние и една от главните причини за това е силното замърсяване с биогенни елементи (азот и фосфор) от пречиствателните станции за отпадъчни води (ПСОВ) и земеделието. Подобно е положението и в България, където според едно изследване от 2014 г. българските притоци на р. Дунав не постигат добро екологично състояние с превишение на нормите основно по БПК₅, нитрати, нитрити, амоняк и фосфати поради замърсяване с отпадъчни води от населените места и земеделските райони. Българската Наредба Н-4 за характеризиране на повърхностните води с последното си изменение от септември 2014 г. налага още по-строги изисквания към концентрацията в тях на БПК₅ и азота в различните му форми. Това поставя на изпитание общоприетите съвременни техники за пречистване на градски отпадъчни води предвид степента на пълноводие на българските реки и ниската им самопречиствателна способност. Наредба № 6 за емисионните норми за отпадъчните води изисква *допълнително пречистване от азот и фосфор* освен *традиционното вторично пречистване* за отпадъчни води от населени места с над 10 000 е.ж., ако заустването им става в чувствителни зони. В тази връзка България изостава значително по отношение на крайните срокове на преходните периоди за изпълнение на Директивата на ЕС за пречистване на градски отпадъчни води

Във втория аспект - очакваните климатични промени, заключенията на някои международни проекти показват затопляне и засушаване за България, от една страна, и ясна тенденция на миграция на населението от селата към големите градове, от друга, което прави последните уязвими поради повишеното водопотребление в условия на

понижаване на валежите и оттока. Тактическите мерки за адаптиране към климатични промени и засушаване включват и използване на води с ниско качество. Следователно темата на дисертацията е актуална, защото дава по-голяма яснота за възможностите за повторно използване на отпадъчни води като алтернативен водоизточник.

Третият аспект е пряко свързан с първите два. Предвид големия брой жители на София, които може да бъдат засегнати при недостиг на вода, районът на столицата е определен като един от най-уязвимите в България към засушаване. Особена актуалност добиват алтернативните източници за водоснабдяване на Столицата в период на спешност и засушаване, един от които може да е Софийската пречиствателна станция за отпадъчни води (СПСОВ) – Кубратово, съгласно констатации както в изследователски проекти, така и в Общия устройствен план на Столична община от 2009 г.

Споменатите по-горе фактори налагат прилагането на по-ефективни технологични решения за пречистване на отпадъчни води. В България обаче все още се разчита основно на традиционни технологии. Този факт прави експерименталните резултати, представени в настоящия дисертационен труд, много актуални с оглед възможно практическо приложение у нас.

2. ПРЕГЛЕД И АНАЛИЗ НА ЛИТЕРАТУРАТА ПО ТЕМАТА

Направен е преглед на нормативните изисквания към отпадъчните води след вторично и допълнително пречистване в селищни ПСОВ, както и към качеството на водите във водоприемниците. Разгледан е в общ план световният и българският опит за допречистване и оползотворяване на отпадъчни води.

2.1 Допречистване на градски отпадъчни води чрез третични бързи филтри

Подробно е разгледано допречистването на градски отпадъчни води чрез третични бързи филтри за отстраняване на остатъчните неразтворени, предимно органични, вещества и свързаните с тях други показатели, като БПК и ХПК, след механичното и биологичното стъпала на класическа ПСОВ. Разгледани са технологичните характеристики и основните типове съоръжения - еднослойни с низходящ поток; двуслойни или многослойни с низходящ поток и еднослойни с възходящ поток, като е направено сравнение между тях. Недостатъците на възходящите филтри насочват настоящото изследване към низходящата филтрация. Направени са следните общи изводи от прегледа и анализа на литературата за третична филтрация:

1) Третичната филтрация е основен метод за допречистване на градски отпадъчни води за достигане на необходимото качество преди заустването им във водоприемници или повторната им употреба.

2) Хидравличното натоварване и продължителността на филтроциклите зависят главно от вида и гранулометричния състав на филтърния пълнеж, и от входната концентрация на неразтворените вещества.

3) Процесът на филтрация трябва да бъде изследван върху всяка конкретна отпадъчна вода, тъй като няма създадена обща математическа зависимост, която го описва. Това обяснява донякъде различните, често противоречиви резултати, докладвани в литературните източници.

4) Повторното използване на третично пречистени отпадъчни води чрез филтрация спестява разходи за търсене и строителство на нови водоизточници, а от друга страна играе важна роля за опазване на природната среда от замърсяване.

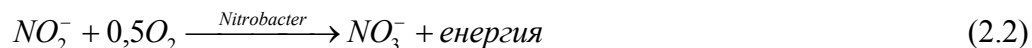
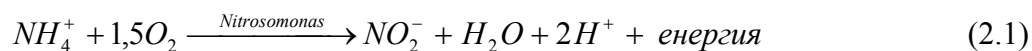
2.2. Пречистване и допречистване от азот на градски отпадъчни води с потопени биологични филтри

В тази точка от глава 2 са разгледани основанията за допречистването на градски отпадъчни води от азот и предимствата на потопените биологични филтри за това.

Все по-строги стават изискванията за отстраняване не само на органичната материя, но и на азотните съединения, които в различните си форми предизвикват съответно еутрофикация на водоприемника, отнемат разтворения кислород в него, оказват токсично въздействие върху водните организми, а при използването му като източник за водоснабдяване създават здравен риск за населението и повишават необходимата доза на хлора за обеззаразяване.

Съвременните изследвания и практика са насочени към интензификация на процесите на отстраняване на органичните вещества и биогенните елементи, вкл. неорганичния азот, с оглед повишаване на техния ефект и икономичност. При това основното внимание е отредено на биологичните методи, като най-евтини и природосъобразни. Пример за прилагането им за допречистване е отстраняването на азота чрез биологична нитрификация-денитрификация във второто стъпало на пречиствателната станция за отпадъчни води

Специално внимание е отделено на същността на биохимичните процеси на нитрификация и денитрификация, които обикновено се представят с реакциите съответно:



(*Pseudomonas, Paracoccus, Acromobacter, Bacillus*)

Разгледани са технологичните изисквания за осъществяването на съответните процеси (кислородна потребност, рН, температура, токсични вещества и инхибитори, източници на въглерод). Представено е техническото им приложение в традиционни системи (капещи биофилтри и реактори с активна утайка), съпоставено с нетрадиционните потопени биологични филтри, които са предмет на настоящата разработка.

2.3. Изследователски подходи, прилагани в световната практика

Разгледани са основните изследователски подходи по света по темата. Поради неизяснения докрай механизъм на процесите, влиянието на голям брой фактори и голямото разсейване в стойностите на данните не е създаден приемлив математически модел с общовалидни функционални зависимости. Обосновано е възприетото в дисертационните изследвания прилагане на физически експерименти и статистически методи за теоретична обработка и анализ на експерименталните данни.

3. СПЕЦИФИЧНИ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНИЯТА

Както е посочено в Глава 1, общата цел на изследванията в дисертационния труд е да се направи оценка на технологичната ефективност на различни типове филтърни системи с минерални пълнежи при пречистване/допречистване на градски отпадъчни води от неразтворени и разтворени въглеродни и азотсъдържащи замърсители, и оптимизиране на някои технологични параметри.

Въз основа на направения преглед и анализ на литературни източници за изследванията и практиките по темата са определени следните специфични цели на дисертационния труд:

1. Определяне и оценяване на влиянието на определени физични и химични условия върху ефекта на пречистване/допречистване на градски отпадъчни води от неразтворени и разтворени въглеродни и азотсъдържащи замърсители, осъществено посредством съоръжения тип бързи гравитационни филтри с инертни пълнежи, и оптимизиране на определени технологични параметри.

2. Разработване и прилагане на научно обоснована теоретична методика, основаваща се на математическата статистика, за обработка и анализ на данните от практическите изследвания, включваща и критерии за сравнителна оценка на действието на съоръженията - за постигане на достоверност, представителност и точност на изводите.

За постигане на общата и на специфичните цели, определени в дисертационния труд, са поставени следните конкретни задачи:

1. Да се направи избор на система от променливи условия и параметри за изследване.

2. Да се изследва процеса на бърза гравитационна филтрация за допречистване на градски отпадъчни води като трето стъпало в технологичната схема (след традиционните механично и биологично стъпала). Изследването да се осъществи в полупромишлени условия на съществуваща двустъпална селищна пречиствателна станция и да обхване следните аспекти:

а) определяне на зависимостта между основните технологични параметри на филтрация на биологично пречистени градски отпадъчни води – скорост на филтрация, напорни загуби, продължителност на филтроцикълa, интензивност и продължителност на промивките, ефект на пречистване по определени показатели;

б) извършване посредством предложената теоретична методика на сравнителен анализ и оценка на действието на различни видове минерални филтърни пълнежи по отношение на ефекта на пречистване и основните оперативни показатели (параметри на филтрация).

3. Да се изследват потопени аерирани биологични филтри (потопени аерирани реактори с прикрепена биомаса) за нитрификация във второто (биологично) стъпало на технологичната схема за пречистване на градски отпадъчни води. Изследването да се осъществи в полупромишлени условия след механичното стъпало на съществуваща селищна пречиствателна станция и да обхване следните аспекти:

а) определяне на влиянието на величината на специфичната повърхност на пълнежите, на натоварването по замърсяване и степента на аерация върху ефекта на пречистване на градски отпадъчни води по определени показатели;

б) извършване посредством предложената теоретична методика на сравнителен анализ и оценка на действието на реакторите относно степента на отстраняване на НВ и органичната материя, и на трансформация на амониевия азот чрез биологична нитрификация.

4. Да се изследва система от два потопени биологични филтъра (потопени реактори с прикрепена биомаса) за допречистване на градски отпадъчни води от азотните съединения чрез нитрификация-денитрификация. Изследването да се осъществи в полупромишлени условия след първото стъпало на съществуваща селищна пречиствателна станция и да обхване следните аспекти:

а) определяне на влиянието на величината на хидравличното натоварване и натоварването по замърсяване върху ефекта на пречистване в комбинация с допречистване от азот, както и определяне на оптималното рециркуляционно отношение за системата;

б) извършване (посредством предложената теоретична методика и резултатите от предишните етапи на изследване) на сравнителен анализ на действието на нитрификационния реактор в двете му състояния – пречистване само с нитрификация и пречистване с нитрификация в комбинация с втори реактор за денитрификация.

4. МЕТОДИКА ЗА СТАТИСТИЧЕСКИ АНАЛИЗ НА ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ДАННИ

В глава 4 е предложен общ алгоритъм за обработване и анализ на ограничен обем емпирични данни в разглежданата област с цел достигане до статистически изводи и заключения за сравнявани генерални съвкупности, като в отделните стъпки е направен обзор на различни статистически методи. Прилагат се теорията на оценките и методи за проверка на хипотези. Избани са критерии, основаващи се на разпределения различни от нормалното на Гаус, на които се подчиняват малки извадки - с обем $n < 20$, какъвто е обикновено случаят при провеждане на физически експерименти.

Подходът сам по себе си е известен в други науки, но не е прилаган в този му изчерпателен вид в областта на водоснабдителните и канализационните системи за пречистване на води.

При обработването и анализа на резултатите от експерименти за пречистване на градски отпадъчни води се предлагат следните стъпки:

- 1) отстраняване на рязко отличаващи се стойности;
- 2) проверка за симетричност и нормалност на разпределението;
- 3) проверка на хипотези за равенство на математически очаквания, на дисперсии и функции на разпределение.

Тези стъпки са развити теоретично по следния алгоритъм за обработка и анализ на експерименталните данни:

- 1) От редиците с експериментални данни се отстраняват рязко отличаващи се стойности по критерия на Шовене

$$u = \frac{|x_n - \bar{x}|}{s} . \quad (4.1)$$

- 2) Прави се проверка за характера на разпределението на данните, като се изчисляват моментния коефициент на асиметрия A и ексцесът E , и се сравняват с критични стойности.

$$A = \frac{1}{n \cdot s^3} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3 \quad (4.4)$$

$$E = \frac{1}{n \cdot s^4} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4 - 3 \quad (4.5)$$

Анализирането на съвкупностите, за които се удовлетворява критерият на съгласие с нормалното разпределение, продължава съгласно стъпка (5).

3) Разпределението на редица, което не е безусловно нормално по горната проверка, се сравнява с разпределението на съответна извадка с доказано нормално разпределение, като за целта се използва непараметричният рангов метод на Уилкоксън.

$$W = \sum_{j=1}^{n_2} R_j \quad (4.8)$$

W се съпоставя с теоретични стойности w_T при дадено ниво на значимост. При неотхвърляне на нулевата хипотеза (за равенство на функциите на разпределение) се приема, че двете разпределения са идентични, следователно и основните им параметри са равни, и се преминава към стъпки (5) и (6).

4) При отхвърляне на нулевата хипотеза, т.е. при неравенство на функциите на разпределение, се приема, че те са от един и същи вид, но се различават само по параметър на положението. Това означава равенство на дисперсиите, което се проверява по непараметричния критерий на Сигел-Тюки.

$$S = \sum_{i=1}^{n_1} R(x_i). \quad (4.10)$$

5) При доказано нормално разпределение се сравняват дисперсиите на редиците от опитни данни чрез проверка на хипотези с прилагане на F -критерия, използващ разпределението на Фишер.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2}. \quad (4.7)$$

6) Сравняват се средно аритметичните стойности на редиците от опитни данни чрез

а) непараметричния критерий на Уилкоксън. При предположението в стъпка 4) проверката за равенство на двете средни величини може да се извърши и по едностранния критерий на Уилкоксън, ако това е оправдано от физическата същност на изследваните явления. От друга страна допускането, че разпределенията са от един и същи вид, означава на практика нормалност на разпределението и на втората съвкупност, което дава право за прилагане и на параметрични критерии за проверка на равенството на две математически очаквания съгласно стъпка (6б);

б) проверка на хипотези с прилагане на t -критерия, използващ разпределението на Стюдент

$$t = \frac{|\bar{x} - \bar{y}|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} . \quad (4.6)$$

В случаите, при които се оказва, че генералните съвкупности са с различни дисперсии ($F > F_T$), за намиране на критичната стойност t_C се използва апроксимацията на Кокран

$$t_C = \frac{w_1 t_1 + w_2 t_2}{w_1 + w_2} , \quad \text{където} \quad (4.12)$$

$w_1 = s_1^2/n_1$, $w_2 = s_2^2/n_2$, а t_1 и t_2 се взимат от разпределението на Стюдънт за степени на свобода съответно (n_1-1) и (n_2-1) .

По гореописаните методи са сравнявани и относителни статистически величини – ефектите на пречистване

$$\eta = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100, \% . \quad (4.16)$$

В случаите, при които това е оправдано от постановката на опита, редиците се третираят като такива със съответни членове и се работи и със „сдвоения t -тест“ по метода на Мудра, описан в глава 4 от дисертацията. Казано с други думи двойката тук се отнася за разделена на две проба сурова отпадъчна вода, преминала през два реактора, претърпявайки съответни трансформации, и засечена на двата изхода.

Описаният алгоритъм е представен в блок-схема (фигура 4.1).

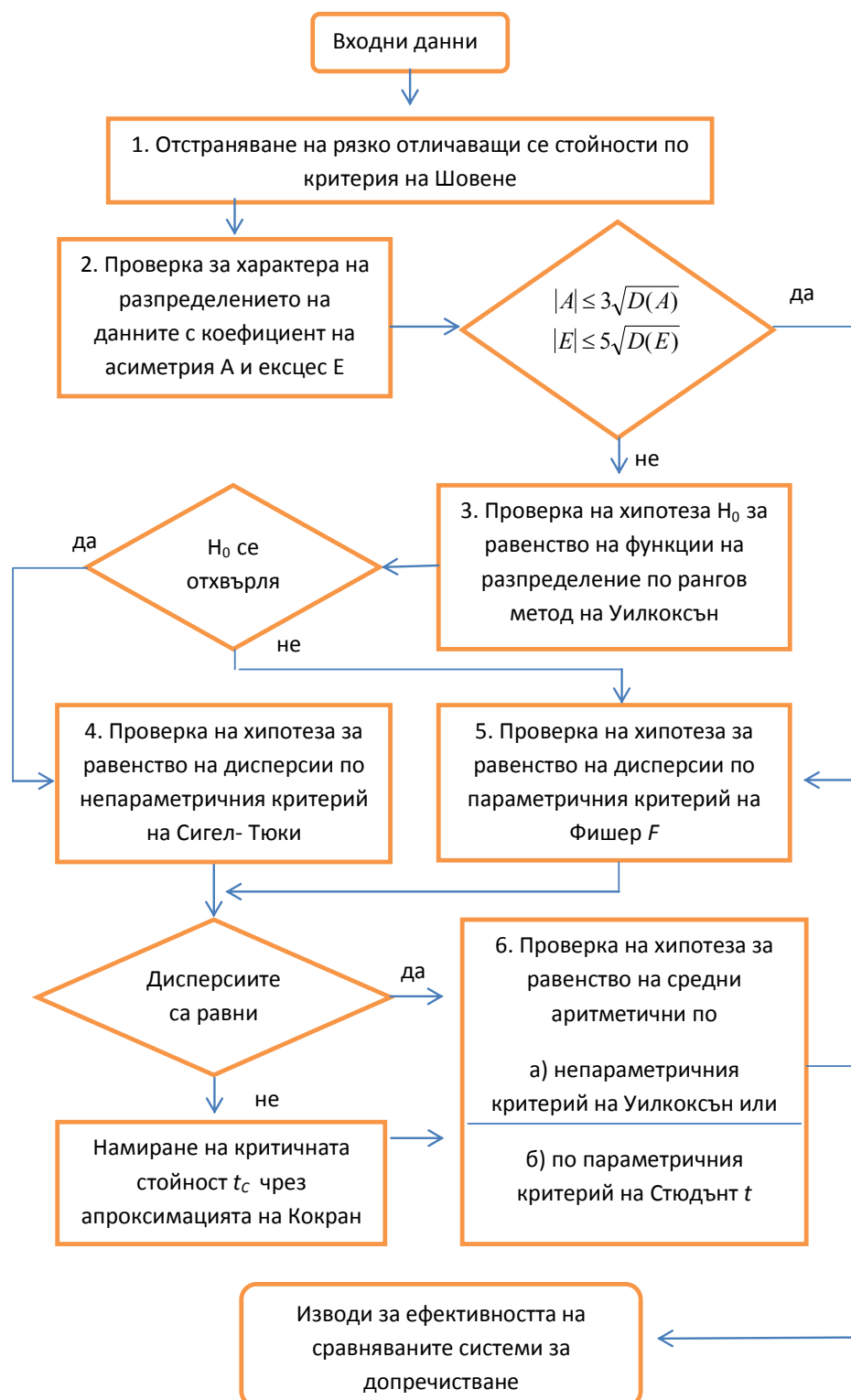
За подпомагане на изчислителната работа по така описаната методика са разработени програми на *FORTRAN*, приложени при теоретичното изследване с наличните експериментални данни.

За изследване на зависимости от корелационен тип в настоящото изследване се използват методи на регресионния анализ. Работи се с еднофакторни модели, чийто общ математически израз може да се представи с формулата

$$Y = f(X, \varepsilon), \quad (4.17)$$

където с Y се отбелязва зависимата променлива (резултатът, следствието), с X - независимата (факторът, причината) и с ε -случайната компонента в модела. В процеса на моделирането на връзките също се прилага проверка на хипотези относно адекватността на използваните модели по избрани критерии, описани в т.4.4. на глава 4 в дисертационния труд.

За проверките са избрани нива на значимост на нулевата хипотеза $p=0,05$ и $p=0,01$, като се работи с едностранна и двустранна критични области в зависимост от алтернативната хипотеза.



Фиг. 4.1. Блок-схема на обобщения алгоритъм за статистически анализ и оценка на експерименталните данни от малки извадки

5. ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА БЪРЗИ ГРАВИТАЦИОННИ ФИЛТРИ ЗА ТРЕТИЧНО ПРЕЧИСТВАНЕ НА ГРАДСКИ ОТПАДЪЧНИ ВОДИ

В този етап са изследвани при различни условия три вида бързи гравитационни филтри за допречистване на градски отпадъчни води, като трето стъпало (след механичното и биологичното) в технологичната схема. Единият аспект на изследването е определяне на зависимостта между основните технологични параметри на филтрация на биологично пречистени градски отпадъчни води - скорост на филтрация, напорни загуби, продължителност на филтроцикла, интензивност и продължителност на промивките, ефект на пречистване по определени показатели. Другият аспект на изследването е извършване посредством предложената в глава 4 теоретична методика на сравнителен анализ и оценка на действието на различните филтърни пълнежи по отношение на ефекта на пречистване и основните оперативни показатели.

5.1. Материали и методи

Научно-изследователската работа е осъществена в полу-производствени и лабораторни условия. Проведени са физически експерименти на територията на Софийската пречиствателна станция за отпадъчни води (СПСОВ)-Кубратово. Лабораторните и теоретичните анализи са извършени в Институт по водни проблеми (ИВП) – БАН².

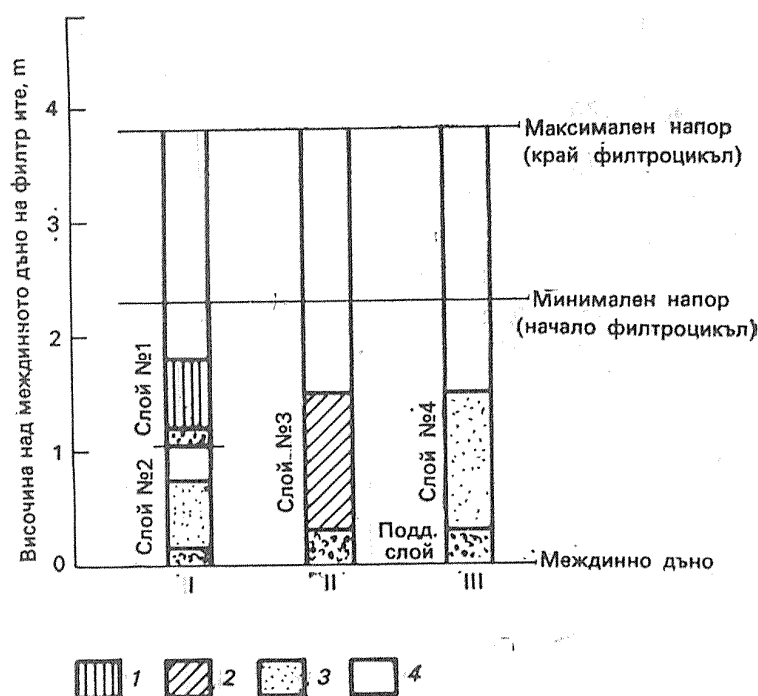
СПСОВ е проектирана и е изградена в периода 1975-1980 г. като класическа станция за двустепенно механично и биологично пречистване на 480 000 m³/d постъпващи отпадъчни води с БПК₅ = 220 mg/dm³ = 100 t/d. Станцията е проектирана за 68% битов и 32 % промишлен приток. В периода, в който са извършвани настоящите изследвания, обаче, промишлеността на столицата предизвиква значително замърсяване на водите, което се отразява и на работата на станцията. Този факт, както и наличието на технически и експлоатационни проблеми са причина оттокът от СПСОВ в редица случаи да не отговаря на изискванията на действащите тогава норми за пределно допустими концентрации на неразтворени вещества (НВ), биохимично потребен кислород (БПК₅), химично потребен кислород (ХПК), амоняк, нитрити и др.

Табл. 5.1 Физични характеристики на пълнежите за третичните филтри

Вид на пълнежа	Зърнометричен състав								Височина на слоя		
	d_{min}	d_{max}	d_{10}	d_{60}	d_{80}	k_1	k_2	d_{eq}	I ф.	II ф.	III ф.
	mm	mm	mm	mm	mm	-	-	mm	m	m	m
Керамзит едра фракция (слой № 1)	2,0	5,0	2,10	3,12	4,08	1,94	1,49	-	0,60	-	-
Керамзит дребен (слой № 3)	1,0	2,0	1,20	1,52	1,68	1,40	1,27	1,29	-	1,20	-
Пясък (слой № 2 и 4)	1,0	2,0	1,27	1,59	1,80	1,42	1,25	1,35	0,60	-	1,20
Чакъл (поддържащ слой)	2,0	40,0	-	-	-	-	-	-	0,15 0,15	0,30	0,30
Обща височина на пълнежа									1,50	1,50	1,50

² След структурни промени ИВП - БАН вече е департамент „Управление и използване на водите“ в Националния институт по метеорология и хидрология (НИМХ) към БАН.

Опитната инсталация се състои от три плексигласови колони с вътрешен диаметър 90 мм и височина 4 м, заредени с различни видове пълнежи от пясък и трошен керамзит (табл. 5.1 и фиг. 5.2):



Фиг. 5.2. Конфигурация на филтърните пълнежи
I – двуслоен пясъчно-керамзитов филтър; II – еднослоен керамзитов филтър; III – еднослоен пясъчен филтър

Водата за допречистване се подава чрез помпа и разпределителна система в горната част на филтърните колони, които работят с променлив дебит и покачващо се водно ниво, т.е. без специално регулиращо устройство на скоростта на филтрация - режим, срещан и в практиката поради технически и икономически предпоставки. Хидравличното натоварване, респ. скоростта на филтрация, се мени в диапазона $3,6 \div 9,5 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ при различните опити, като се контролира през интервали $0,5 \div 1,0 \text{ h}$ посредством ротаметри. Тогава се отчитат и напорните загуби във филтърния слой чрез пиезометрични табла. Допустимата максимална напорна загуба е 1,5 m, след достигането на която филтърът се изключва за промивка.

Експерименталната филтрационна инсталация се охранва от изходния поток на СПСОВ, т.е. след механичното и биологичното ѝ стъпало, и действа при условия на неравномерен и в някои случаи превишаващ допустимите норми приток на замърсяванията поради тогавашни технически проблеми на пречиствателната станция. През 2,5 h се вземат проби от входа и изхода на всяка колона, които се анализират в химическа лаборатория по стандартни методики за редица показатели, основните от които са неразтворени вещества (НВ), общ сух остатък, БПК₅, ХПК, амониев, нитритен и нитратен азот.

Получените резултати са обработени, анализирани и оценени статистически чрез вариационен анализ по описаната в глава 4 методика. За установяване достоверността на разликите между стойностите на съвкупностите от данни за трите вида филтри са използвани критериите на Стюдънт t и на Фишер F , определени по формули (4.6) и (4.7).

За да се осигури съпоставимост на резултатите за трите типа филтри при различно хидравлично натоварване, от авторката е въведен критерият K_v , наречен *относителна (специфична) задържаща способност*. Той е модификация на известния показател *задържаща способност* или *акумулиращ капацитет*, но за единица обем преминала през филтъра вода:

$$K_v = \frac{\sum \Delta C_i v_i \Delta t_i}{\sum v_i \Delta t_i}, \quad \text{g/m}^3, \quad (5.1)$$

където $\Delta C_i = C_{0,i} - C_{1,i}$ е разликата между входната и изходната концентрации при i -тото наблюдение в рамките на един опит, g/m^3 ; v_i - скорост на филтрация при i -тото наблюдение, m/h ; Δt_i - времеви интервал между i -тото и $i-1$ -то наблюдение, h .

Числителят във формула (5.1) изразява количеството сухо вещество, задържано на 1 m^2 филтърна площ за времето на опита $t = \sum \Delta t_i$. Знаменателят изразява обема вода, преминал през 1 m^2 филтърна площ за времето на опита.

За да се игнорира влиянието на различните скорости на филтрация при отделните наблюдения, се въвежда и параметърът *относителна загуба на напор* h_v , представляващ загубата на напор за единица хидравлично натоварване (за единица скорост на филтрация):

$$h_v = \frac{h_i}{v_i}, \quad \text{където} \quad (5.2)$$

h_i е абсолютната загуба на напор при i -тото наблюдение в един опит, m , а v_i е скоростта на филтрация при i -тото наблюдение, m/h .

5.2. Резултати и обсъждане

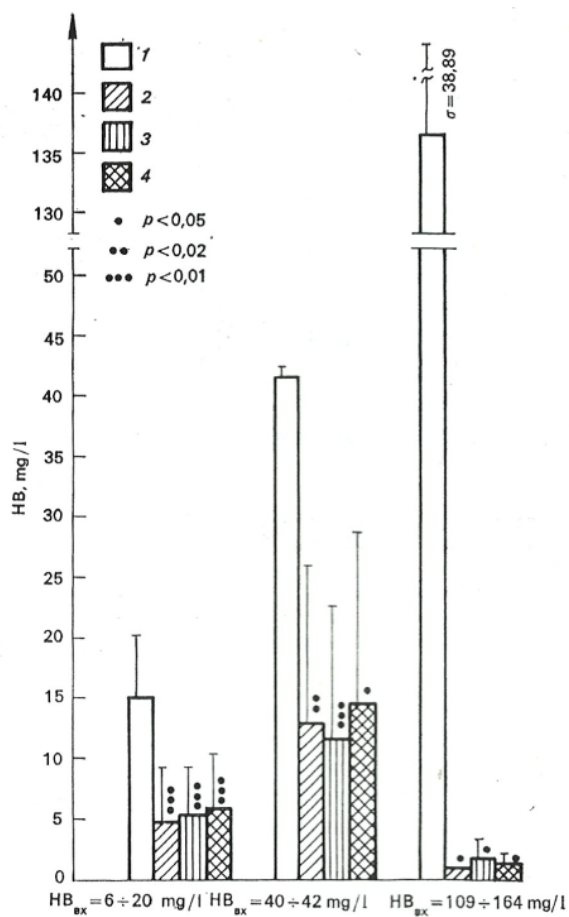
Лабораторните физико-химически анализи установяват, че основните качествени параметри на отпадъчните води, които се повлияват от процеса филтрация, са неразтворените вещества и свързаният с тях БПК₅. Затова в по-нататъшното изложение анализът и оценката се правят от гледна точка на отстраняване на НВ и БПК₅.

5.2.1. Ефект на допречистване по НВ и БПК₅

Аналитичното сравняване на редиците от концентрации на неразтворените вещества (НВ) в постъпващата вода с тези на съответния филтрат от всяка опитна колона установява, че разликите между входа и изхода са статистически достоверни (съществени) и не се дължат на случайни фактори (фиг.5.4).

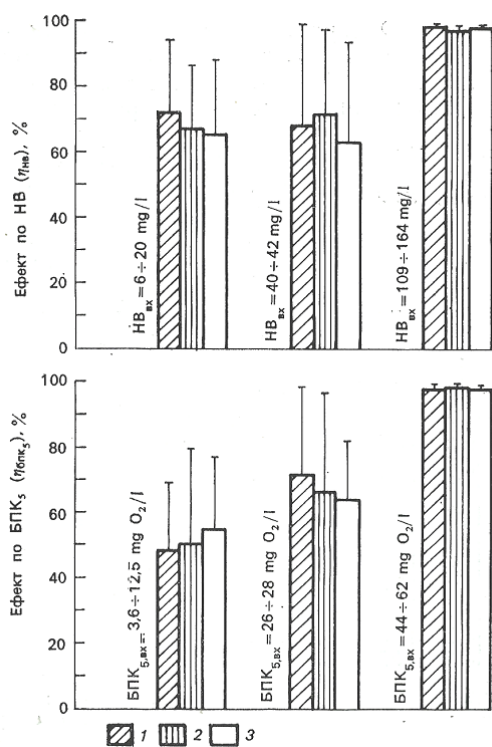
Както при ниски входни концентрации на неразтворените вещества – под 20 mg/dm^3 , така и при високи – $100-160 \text{ mg/dm}^3$, с филтрирането се постига висок ефект на отстраняването им – $65-98\%$, като на изход се наблюдават стойности и под 2 mg/dm^3 (фигури 5.4 и 5.5).

Ефектът на допречистване по БПК₅ варира в граници $50 - 98\%$ при входни концентрации $8 - 62 \text{ mg/dm}^3$ и изходни стойности, достигащи също до под 2 mg/dm^3 (фиг. 5.5).



Фиг.5.4. Концентрации на неразтворените вещества при третична филтрация (ср. ст. и станд. откл.)

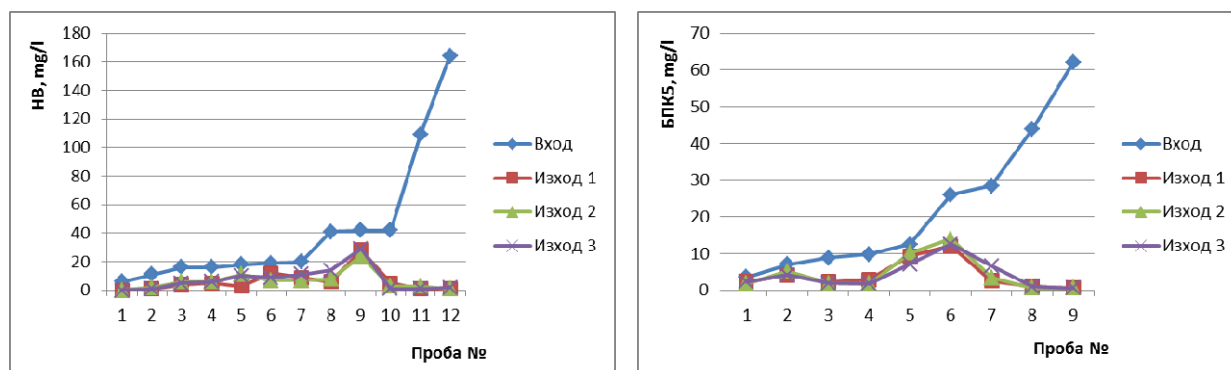
1 – на вход;
2 – след двуслойния филтър;
3 – след керамзитовия филтър;
4 – след пясъчния филтър



Фиг.5.5. Ефекти на допречистване по неразтворени вещества и БПК₅ при третична филтрация (средни стойности и стандартни отклонения)

1 - двуслоен филтър;
2 – керамзитов филтър;
3 – пясъчен филтър

И при НВ, и при БПК₅ по-високите ефекти се отнасят за по-голяма замърсеност на постъпващите отпадъчни води. В редица случаи изходната концентрация се оказва по-ниска при екстремни входни стойности, отколкото при филтриране на добре пречистена биологично отпадъчна вода (фиг. 5.6).



Фиг. 5.6. Динамика на концентрациите на НВ и БПК₅
1 – двуслоен филтър; 2 – керамзитов филтър; 3 – пясъчен филтър

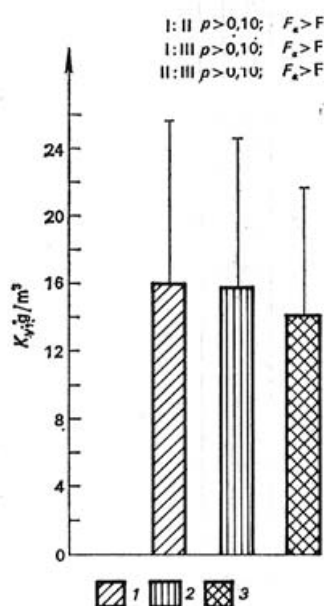
Това може да се обясни с образуването на филм от отложени върху повърхността на пълнежа и във вътрешността му биологични флокули, които допълнително задържат подобните си, идващи с входния поток. Подобен резултат и тълкуване се докладват от други автори при експерименти за третично пречистване с утаители, където малките частици се „прихващат“ от големите флокули и биват отстранени. При третичните утаители, обаче, за разлика от тук изследваните третични филтри, отстраняването на частиците винаги се влияе право пропорционално от входното натоварване и не надвишава 73 %.

Настоящите резултати показват, че третичните филтри се справят много добре при екстремално замърсяване вследствие проблеми при вторичните утаители. Тези случаи, обаче, затрудняват експлоатацията на филтърните системи и са нежелателни.

5.2.2. Относителна задържаща способност K_v

При статистическия анализ не се доказва достоверно различие ($p > 0,1$) между редиците от стойности на K_v изчислени за всеки филтър въз основа на експерименталните резултати, част от които са показани на фиг. 5.7. Следователно трите вида филтърни пълнежи имат еднаква относителна задържаща способност. Затова сравнителният статистически анализ е приложен директно към редиците от стойности на изходните концентрации на НВ и на ефектите на пречистване.

Не се доказва статистически достоверна разлика в качеството на филтрата при трите вида пълнежи ($p > 0,1$), т.е. те произвеждат еднакъв по качество филтрат при еднакви качествени показатели на входната вода. Подобни резултати се докладват от други изследователи, но изводите при тях, за разлика от настоящата разработка, се правят само въз основа на емпиричен, а не и на математически анализ. Това ги лишава от точна и убедителна обосновка предвид срещаните в литературата противоречиви научни резултати относно едни и същи технологични параметри.

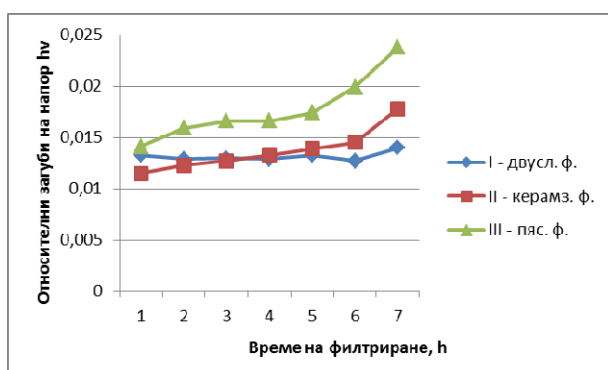


Фиг. 5.7. Относителна задържаща способност K_v при $H_{B_{\text{вх}}} = 6 \div 42 \text{ mg/dm}^3$ (средни стойности и стандартни отклонения)

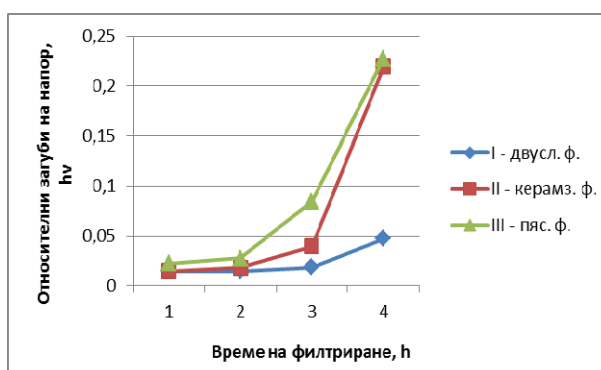
- 1 – двуслоен филтър I;
2 – керамзитов филтър II;
3 – пясъчен филтър III

5.2.3. Относителна загуба на напор h_v

С въвеждането на параметъра h_v колебанията на абсолютните загуби на напор, дължащи се на променливото хидравлично натоварване, се изглаждат и нарастването на хидравличните съпротивления в течение на времето се очертава ясно. Това проличава по-отчетливо при ниска степен на замърсяване, когато напорните загуби във филтъра нарастват много бавно. На фигури 5.8 и 5.9 са илюстрирани в графична форма изчислените относителни загуби на напор за два опита Б и Г – съответно в условията на нормално и върхово входно замърсяване.



Фиг. 5.8. Нарастване на относителните загуби на напор (Опит Б)



Фиг. 5.9. Нарастване на относителните загуби на напор (Опит Г)

И в двата случая се наблюдава значително по-нисък темп на нарастване на напорните загуби в едрозърнестия пясъчно-керамзитов филтър в сравнение с двата еднослойни. От това следва много по-дълъг филтроцикъл и по-редки промивки при еднакъв ефект на пречистване, оттук – по-голям акумулиращ капацитет за един

филтроцикл. При еднослойния керамзитов филтър хидравличните съпротивления в началото нарастват по-бавно, отколкото при пясъчния, но след определен момент графиката става по-стръмна и общите напорни загуби при двата вида еднослойни филтри почти се изравняват (фиг. 5.9).

5.2.4. Промиване на филтрите

Промивката в случая не е основен предмет на това изследване, а се разглежда като съпътстващ процес на филтрацията. В тази точка на дисертацията е описано и сравнено поведението на филтърните пълнежи и по време на промивка, което е отразено в направените по-долу изводи.

5.3. Обобщение и изводи за технологичната ефективност на третичните филтри

1) Третичната филтрация дава съществен ефект на допречистване на биологично пречистени градски отпадъчни води по неразтворени вещества и свързания с тях БПК₅, като може да намали концентрацията им до стойности под 2 mg/dm³.

2) Качеството на филтрата не се влошава при променливо и много високо входно натоварване по тези показатели, което е гаранция за надеждно и стабилно пречистване. Следователно изследваният метод на допречистване е отлично решение в случаи на продължителни или чести проблеми в биологичното стъпало. Обаче, шокови натоварвания не са желателни, защото влияят отрицателно на останалите технологични параметри на филтрите.

3) Въведените от авторката технологични параметри „относителна задържаща способност“ K_v и „относителна загуба на напор“ h_v позволяват да се направи сравнителен анализ на действието на различни филтри, работещи паралелно в условия на неравномерно и нееднакво помежду им хидравлично натоварване.

4) Въз основа на използваните статистически критерии за вариационен анализ и на технологичния критерий K_v за съпоставимост на резултатите при неравномерно хидравлично натоварване се установява, че няма статистически значима разлика между качеството на допречистената отпадъчна вода от едрозърнестия двуслоен пясъчно-керамзитов филтър и това от по-дребнозърнестите еднослойни (пясъчен и керамзитов) филтри. Следователно окончателният избор на най-подходящ тип филтрационен пълнеж зависи от останалите технологични параметри на филтърните системи, както и от икономически и експлоатационни съображения.

5) Акумулиращият капацитет на двуслойния пясъчно-керамзитов филтър е много по-висок при значително по-нисък темп на нарастване на напорните загуби дори при много високи натоварвания по замърсяване. Това означава по-дълги филтроцикли и по-редки промивки.

6) В случай на високо входно натоварване по неразтворени вещества е препоръчително пулсиращо промиване, ако няма предвидени повърхностни устройства за отстраняване на замърсяванията.

7) Двуслойният пясъчно-керамзитов филтър се промива по-лесно от еднослойния керамзитов при по-малка промивна интензивност и разширение на слоевете. Пясъчният слой, като по-тежък, е по-слабо застрашен от извличане с възходящия промивен поток, но изисква по-голяма промивна интензивност, което осъществява процеса.

6. ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПОТОПЕНИ АЕРИРАНИ БИОЛОГИЧНИ ФИЛТРИ ЗА НИТРИФИКАЦИЯ ВЪВ ВТОРОТО СЪПАЛО НА ГРАДСКА ПСОВ

Използваната за настоящото изследване схема комбинира окисляването на органичните въглеродни съединения и амониевия азот. В този етап са изследвани при различни условия два вида потопени аерирани биологични филтри, които по същество представляват реактори с прикрепена към минерални пълнежи биомаса. Единият аспект на изследването е да се определи влиянието на величината на специфичната повърхност на пълнежите, на натоварването по замърсяване и на степента на аерация върху ефекта на пречистване. Другият аспект на изследването е с помощта на предложената теоретична методика да се извърши сравнителен анализ и оценка на действието на реакторите относно степента на отстраняване на НВ и органичната материя, и на трансформация на амониевия азот чрез биологична нитрификация.

6.1. Материали и методи

Физическите експерименти са проведени на пречиствателната станция за отпадъчни води на град Рединг, Англия.

Опитната инсталация се състои от две пластмасови колони с вътрешен диаметър 152 mm, обща височина 2,20 m и височина на пълнежа 1,70 m (фиг. 6.1). В качеството на филтрационна и поддържаща биофилма среда се използва порест материал от експандирана глина - гранулиран в Колона 1 и трошен в Колона 2.



Фиг. 6.1. Общ изглед на една опитна колона за нитрификация

Пълнежите за двете колони са подбрани с еднакъв зърнометричен състав. Това дава възможност да се проследи влиянието на порестостта и специфичната повърхност върху действието на реакторите. Физичните характеристики на пълнежите са показани в таблица 6.1.

Табл. 6.1. Физични характеристики на пълнежите на потопените биологични филтри

Реактор	Вид на материала	d_{10} mm	d_{80} mm	d_{eq} mm	ρ_s kg/m ³	m %	S m ² /m ³
Колона 1	гранулиран	2,70	4,37	3,47	2324,6	62	1239
Колона 2	трошен	2,95	4,38	3,64	2209,2	66	1468

За определяне на горните физични характеристики на пълнежите са използвани лабораторни методи и физически модел, като са приложени теорията на утаяването, теорията на вероятностите и математическата статистика. Подробно е описана методиката за определяне на характерен диаметър на зърната в нееднороден филтърен пълнеж и на специфичната повърхност на пълнежа - със съответните формули.

Денонощната неравномерност на качествените характеристики на входната отпадъчна вода има определен цикличен характер, който е установен от предварителни наблюдения върху колебанията на стойностите по основните показатели и се характеризира с по-ниски концентрации сутрин и по-високи - следобед. Това дава възможност действието на реакторите да се изследва в естествени условия при различно натоварване по замърсяване, означено условно като „ниско натоварване“ (НН) и „високо натоварване“ (ВН).

Отпадъчната вода, преминала през механичното стъпало на пречиствателната станция, постъпва към опитните колони низходящо при хидравлично натоварване $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$. В противоток се нагнетява въздух от долната част на реакторите за поддържане на аеробния режим. Проведени са две групи експерименти, различаващи се по количеството на подавания въздух :

- I: $Q_{\text{въз}} = 4 \text{ dm}^3/\text{min} = 13,3 \text{ m}^3 \text{ въздух} / \text{m}^3 \text{ отпадъчна вода} ;$
- II : $Q_{\text{въз}} = 6 \text{ dm}^3/\text{min} = 20,0 \text{ m}^3 \text{ въздух} / \text{m}^3 \text{ отпадъчна вода} .$

С оглед сравнимост на резултатите са поддържани подобни оперативни условия: пробите от входа, изхода и по височина на реакторите се вземат в точно определени моменти сутрин и/или следобед. Колоните се промиват по едно и също време всеки ден при обща продължителност на трифазната водо-въздушна промивка 4,5 min и воден разход $8,3 \div 10 \%$ от полезната денонощна производителност на установката.

Пробите са анализирани в лабораторния корпус на пречиствателната станция по британските стандартни методики и валидираните методики на специализираните лаборатории на оператора по показателите: температура, pH, разтворен кислород, неразтворени вещества (НВ), БПК₅, ХПК, общ азот по Келдал (N_k), амониев (NH₄-N) -, нитритен (NO₂-N) - и общ окислен (NO_x-N) азот.

За обработване на суровите данни и последващото анализиране и оценяване на резултатите, и извеждане на зависимости се следва предложената от авторката методика, описана в Глава 4 на дисертационния труд. Обоснован е методът за изчисляване на средните стойности на pH, което се налага поради формата на дефиниране на този показател, като отрицателен логаритъм от концентрацията на водородните йони [H⁺].

Въз основа на получените експериментални и изчислителни резултати е направена оценка за технологичната ефективност на изследваните потопени аерирани биологични филтри.

6.2. Резултати и обсъждане

6.2.1. Първа група експерименти (степен на аерация I)

6.2.1.1. Условия на средата

В таблица 6.2 са отразени средните входни и изходни стойности на някои важни фактори на средата, в която протичат биохимичните процеси.

Табл. 6.2. Условия на средата при нитрификация – средни стойности (аерация I)

	pH			Р-рен O ₂			Температура на водата		
	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2
	-	-	-	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	°C	°C	°C
НН	7,32	7,71	7,76	1,1	1,8	2,9	18,8	20,3	20,3
ВН	7,57	7,70	7,69	1,3	1,7	2,5	19,7	22,0	21,8

Входните и изходните стойности на pH при двата реактора се движат в нормалните за процеса нитрификация граници. Температурата на водата е под оптималната за биохимичните процеси, но е в жизнените граници на осъществяващите ги микроорганизми. Концентрацията на разтворения кислород във водата е над препоръчаната за нитрификацията минимална стойност от 1 mg/dm³, вкл. и в тялото на пълнежа, което е установено при взимане на проби по височина на колоните.

Действието на реакторите е изследвано в естествени условия при различно натоварване по замърсяване, означено в началото на експериментите като "ниско" (НН) и "високо" (ВН), тъй като се забелязва ясно изразено практическо различие между съответните входни показатели с едно изключение - на БПК₅. Статистическият анализ на получените две групи входни концентрации за всеки показател наистина не доказва статистически значимо различие между стойностите на БПК₅ за НН и ВН, но по неразтворени вещества (НВ), ХПК и особено по N_к и NH₄-N разликата между НН и ВН е ясно изразена и статистически достоверна. Съдържанието на органични вещества във входния поток може да бъде отнесено към високите концентрации според класификациите за първично утаена отпадъчна вода. Обемното натоварване на реакторите е голямо – средните стойности по БПК₅ превишават 3 kg/m³d, а по ХПК – 6 kg/m³d при режима НН и 8 kg/m³d при ВН. Съответните стойности за амониевия азот също са високи – над 0,4 kg/m³d при НН и над 0,6 kg/m³d при ВН (таблица 6.5).

Табл. 6.5. Средни стойности на натоварването по замърсяване при I степен на аерация

	Реактор	Обемно натоварване, kg/m ³ d				Специфично повърхностно натоварване, g/m ² d			
		БПК ₅	ХПК	N _к	NH ₄ -N	БПК ₅	ХПК	N _к	NH ₄ -N
НН	Колоната 1	3,35	6,14	0,51	0,42	2,71	4,95	0,41	0,34
	Колоната 2	3,34	6,13	0,51	0,42	2,28	4,18	0,34	0,28
ВН	Колоната 1	3,41	8,35	0,72	0,62	2,75	6,74	0,58	0,50
	Колоната 2	3,40	8,30	0,72	0,62	2,31	5,65	0,49	0,42

Бел: Колоната 1 – гранулиран пълнеж; Колоната 2 – трошен пълнеж

При постоянно хидравлично натоварване, респ. еднакво за двата реактора обемно натоварване със замърсяване, средните стойности на повърхностното натоварване по изследваните показатели за Колоната 1 се различават от тези за Колоната 2 в абсолютно изражение поради разликата в специфичната повърхност на пълнежите им.

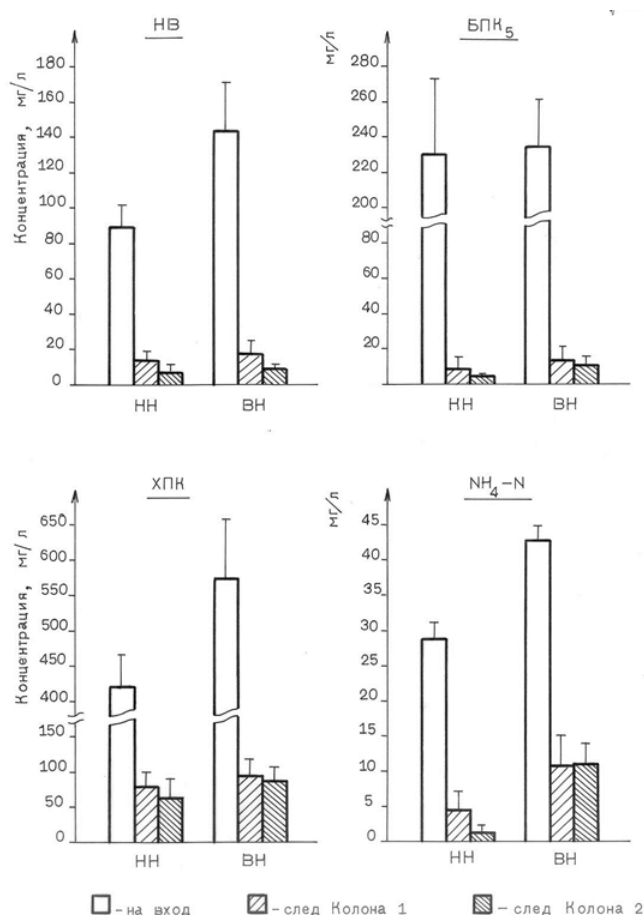
6.2.1.2. Ефект на пречистване

Таблица 6.6. и фигура 6.2 илюстрират качествените параметри на отпадъчната вода на входа и изхода на Колоната 1 и Колоната 2.

Табл. 6.6 Резултати от пречистване с нитрификация - степен на аерация I ($4 \text{ dm}^3/\text{min}$)

		НВ mg/dm^3	БПК ₅ mg/dm^3	ХПК mg/dm^3	N _K mg/dm^3	NH ₄ -N mg/dm^3	NO ₃ -N mg/dm^3	NO ₂ -N mg/dm^3
НН	Вход	89,3*	230,5	420,8	34,8	28,8	0,464	0,072
	Кол. 1	12,3	9,2	79,4	6,7	4,7	6,2	2,303
	Кол. 2	6,5	4,4	63,6	2,5	1,4	13,0	1,351
ВН	Вход	143,8	234,5	573,5	49,8	42,8	0,446	0,108
	Кол. 1	17,6	13,5	95,0	12,5	10,9	13,7	3,273
	Кол. 2	9,0	10,1	87,1	11,1	11,1	11,2	3,112
Наредба 6		35	25	125			10-15	
Наредба 7 за II кат. реки (отм.)		50	15	70		2,0	10	0,04
Наредба Н-4		-	4	-	-	0,3	2	0,06

* - средни стойности ; n=5-8 (брой проби)



Фиг. 6.2. Входни и изходни концентрации на замърсяванията – средни стойности и стандартни отклонения (първа група експерименти – аерация I)

За сравнение в таблицата са приведени действащите в момента емисионни норми за ПСОВ по Наредба 6, валидните до март 2013 г. български норми за

допустимата степен на замърсяване по тези показатели на повърхностни течащи води за II категория повърхностни води и действащите в момента критерии за добро физикохимично състояние на водата в равнинен тип река по Наредба Н-4.

Качеството на пречистената с изследвания вид реактори отпадъчна вода, оценено по средни стойности на основните показатели, отговаря напълно на емисионните норми по неразтворени вещества (НВ), БПК₅, ХПК и азот, но и ги превишава значително, като по първите два показателя дори съответства на качеството на водата във високопланинските участъци на реките.

При условията на по-високо входно натоварване от средното в световната практика потопените аерирани биологични филтри показват много добра ефективност. За НН средният ефект на пречистване по БПК₅ стига до 98% , а по NH₄-N - 94,9 % (табл. 6.7). Подобен резултат по БПК₅ при традиционните съоръжения - по данни на различни автори, се постига при стойности на обемното натоварване не по-високи от 1,20-1,50 kg БПК₅/m³d за биобасейните (т.е. повече от два пъти по-малки от тези при изследваните тук реактори) и 0,35-0,5 kg БПК₅/m³d за капещите биофилтри (повече от шест пъти по-малки от разглежданите в тази разработка).

Табл. 6.7. Ефект на пречистване по основните показатели при аерация I (средни стойности)

Режим на натоварване	Реактор	Пречиствателен ефект, %			
		НВ	БПК ₅	ХПК	NH ₄ -N
НН	Колона 1	86,2	95,9	81,5	83,2
	Колона 2	92,7	98,0	84,6	94,9
ВН	Колона 1	87,6	94,2	83,3	74,7
	Колона 2	93,8	95,8	84,9	74,3

Бел: Колона 1 – гранулиран пълнеж; Колона 2 – трошен пълнеж

6.2.1.3. Оценка на влиянието на степента на входно замърсяване върху степента на пречистване

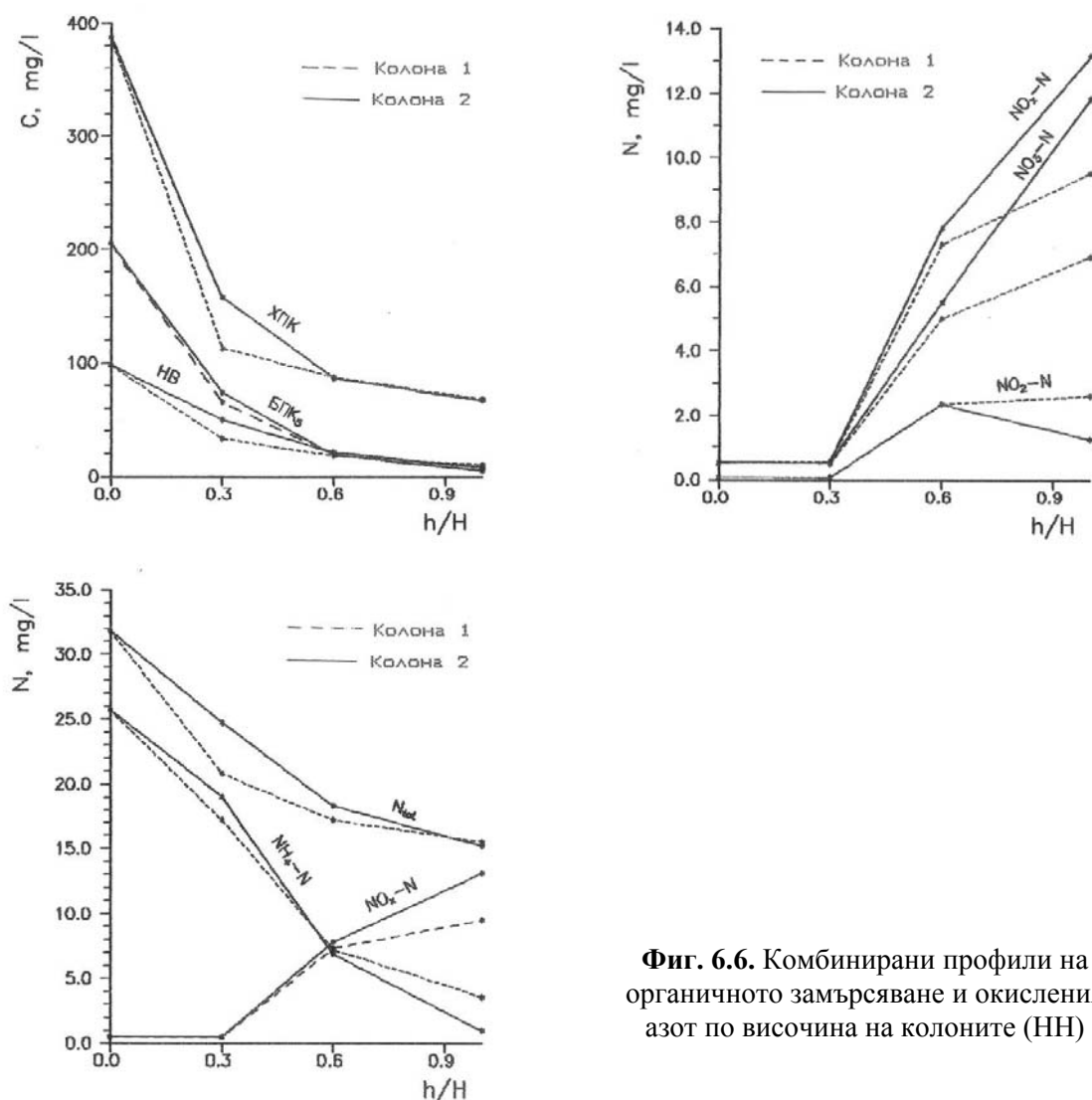
Статистическо сравнение на изходните концентрации за всеки от реакторите в зависимост от входното натоварване показва достоверно различие само по NH₄-N за двете колони и по БПК₅ за Колона 2, който се влошава въпреки недоказаното различие във входните стойности. Това може да се обясни с вероятно инхибиращо действие върху биохимичното окисление вследствие на повишените концентрации по останалите показатели. По отношение на НВ и ХПК действието на реакторите се повлиява незначително или никак от входните колебания на замърсяването в границите, характерни за градските отпадъчни води.

Нарастването на товара по замърсяване се отразява най-значително върху ефекта на пречистване по амониев азот. При средна стойност на обемното натоварване 0,42 kg NH₄-N/m³d (респ. средно повърхностно натоварване 0,28 g NH₄-N/m²d) ефектът на отстраняване при Колона 2 достига 95%, но при натоварване 0,62 kg NH₄-N/m³d (респ. 0,42 g/m²d) той пада до 74% . При Колона 1 ефектът също пада чувствително - от 83,2 % на 74,7 % (табл. табл. 6.5 и 6.7)

При Колона 1, която показва по-лоши резултати като цяло, не се доказва статистически значима разлика по двустранния критерий за ефектите на пречистване при НН:ВН по всички разглеждани показатели. При Колона 2 не се доказва статистически значима разлика между средните стойности на ефектите при НН и ВН по неразтворени вещества и ХПК съответно, но се доказва такава (по двустранния и едностранния критерий) между ефектите на пречистване за НН:ВН по БПК₅ и NH₄-N съответно. Следователно и при ефектите на пречистване, както при изходните

концентрации, най-голяма чувствителност към степента на входното замърсяване показват биологичните процеси, т.е. отстраняването на въглеродните органични съединения и амониевия азот.

В условията на режим НН неколkokратно са взети проби вода от различни нива в пълнежите, което позволява да се очертаят профилите на отстраняване на замърсяванията по височина на реакторите (фиг. 6.6).



Фиг. 6.6. Комбинирани профили на органичното замърсяване и окисления азот по височина на колоните (НН)

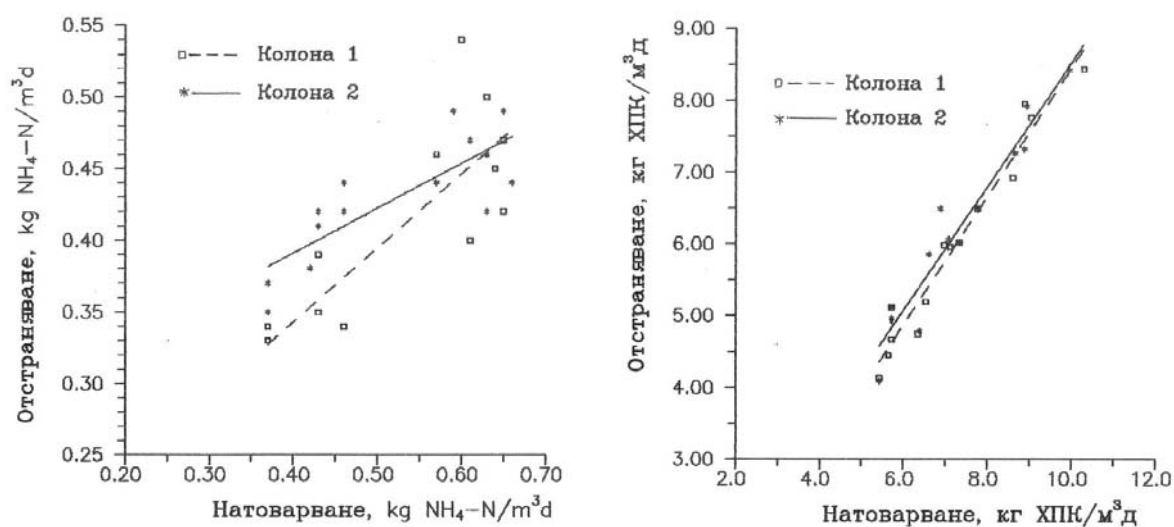
Профилите показват рязко намаляване на органичните вещества в първите 50 cm на пълнежа (горната третина на филтърния слой), където със съдействието на хетеротрофни микроорганизми се отстраняват средно 45,2-63,9 % от неразтворените вещества, с 66,6-67,9 % пада БПК₅ и с 59,9-71,4% - ХПК. Амониевият азот също се редуцира - средно с 35,4-41,5 % - явно за сметка на асимилативните процеси, тъй като в тази част все още не се наблюдава нитрификация. Последната започва в следващия сектор (средната третина) на колоните, където степента на окисляване на амониевия азот е най-висока (най-стръмен наклон на съответните прави на графиката).

Сумарната концентрация на общия азот (органичен и неорганичен) N_{tot} на изхода на реакторите е намалена средно с 48,8-49,1 % в сравнение с входната. Това съвпада с познатите от литературата стойности за ефекта на отстраняване на азота при

конвенционалното пречистване в биобасейни с тази разлика, че изследваните потопени аерирани биологични филтри работят в условията на няколко пъти по-високо входно натоварване по органично замърсяване, както е подчертано по-рано.

Влиянието на различните физически характеристики на пълнежите върху степента на отстраняване на неразтворените вещества, органичната материя и амониевия азот се оценява чрез емпирично и статистическо сравнение между резултатите за двата реактора.

При Реактор 1, чийто пълнеж (гранулиран материал) е с по-малки порестост и специфична повърхност, средните резултати за качеството на пречистената вода са по-лоши в абсолютно изражение както в режима НН, така и в режима ВН в сравнение с тези при Реактор 2. Фигура 6.7 отразява величината на отстраняване на замърсяването по показателите амониев азот и ХПК в зависимост от съответното входно натоварване.



Фиг.6.7. Отстраняване на $\text{NH}_4\text{-N}$ и ХПК в зависимост от натоварването (степен на аерация I)

Очевидно при високи концентрации на замърсителите по-голямата специфична повърхност на пълнежа не допринася за по-добър ефект на пречистване, но с намаляване на съответните концентрации по-голямата порестост на пълнежа става решаваща за повишаване на технологичната ефективност - най-вече за азотните съединения.

Изводът, направен въз основа на експертна оценка на качеството на пречистената вода, е проверен и уточнен по методите на математическата статистика. Статистическият анализ на редиците от концентрациите на замърсителите в пречистената вода при режим НН не доказва значима разлика между Колоната 1 и Колоната 2 по отношение на показателите БПК₅ и ХПК по двустранния критерий. Обаче, проверката с едностранен критерий по метода на Мудра за сдвоените редици потвърждава алтернативната хипотеза, съгласно която Реактор 2 дава по-добри резултати по този показател от Реактор 1. Статистически достоверно различие се наблюдава по НВ и $\text{NH}_4\text{-N}$ при режима НН. Технологичният фактор за това очевидно е по-голямата порестост, респ. специфична повърхност, на трошения материал в Колоната 2, които предопределят по-ниско повърхностно натоварване по замърсяване при по-голяма концентрация на прикрепена биомаса. При режима ВН статистически достоверна разлика между двата изследвани реактора се доказва само за НВ, но не и за

БПК₅, ХПК и NH₄-N. По отношение на ефектите на пречистване може да се обобщи, че статистически достоверно различие между Реактор 1 и Реактор 2 в полза на втория се наблюдава за НВ при ниско и високо натоварване, и за NH₄-N при по-ниската степен на замърсяване.

6.2.2. Втора група експерименти (степен на аерация II)

При тази група експерименти аерацията е повишена на $Q_{\text{въз}} = 6 \text{ dm}^3/\text{min} = 20,0 \text{ m}^3 \text{ въздух} / \text{m}^3 \text{ отпадъчна вода}$. Останалата част от експерименталната схема е подобна на предишната. Тук вниманието е съсредоточено предимно върху Колона 2, дала по-добри резултати за отстраняване на NH₄-N при опитите със степен на аерация I.

6.2.2.1. Условия на средата

В таблица 6.12 са отразени средните стойности на някои важни фактори на средата, в която протичат биохимичните процеси.

Табл. 6.12. Условия на средата при нитрификация – средни стойности (аерация II)

	pH			Р-рен O ₂			Температура на водата		
	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2
	-	-	-	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	°C	°C	°C
НН	7,38	7,85	7,92	1,5	2,0	2,8	18,6	21,8	21,0
ВН	7,60	7,77	7,79	1,3	2,0	2,8	19,4	22,2	21,2

Входните и изходните стойности на pH при двата реактора се движат в нормалните за процеса нитрификация граници. Температурата на водата е под оптималната за биохимичните процеси, но е в жизнените граници на осъществяващите ги микроорганизми. Концентрацията на разтворения кислород във водата е над препоръчаната за нитрификацията минимална стойност от 1 mg/dm³.

В таблица 6.13 са дадени средните стойности на входното натоварване по основни качествени показатели. И тук обемното натоварване на реакторите по замърсяване е над средното, характерно за отпадъчните води след механичното стъпало.

Табл. 6.13. Средни стойности на натоварването по замърсяване при II степен на аерация

	Реактор	Обемно натоварване, kg/m ³ d				Специфично повърхностно натоварване, g/m ² d			
		БПК ₅	ХПК	N _K	NH ₄ -N	БПК ₅	ХПК	N _K	NH ₄ -N
НН	Колона 1	3,31	6,00	0,50	0,39	2,68	4,84	0,40	0,32
	Колона 2	3,34	6,52	0,48	0,40	2,28	4,44	0,33	0,27
ВН	Колона 1	2,89	6,34	0,72	0,60	2,33	5,12	0,58	0,48
	Колона 2	3,25	7,57	0,71	0,60	2,22	5,16	0,48	0,41

Бел: Колона 1 – гранулиран пълнеж; Колона 2 – трошен пълнеж

Запазват се същите моменти на вземане на пробите в условията на денонощна неравномерност на замърсяването във входната отпадъчна вода. При тази група експерименти освен денонощната се проявява и сезонната неравномерност при входното замърсяване поради хронологическата последователност на направените опитни изследвания. В този аспект се оказва, че средните входни стойности при

условните режими НН и ВН се сближават, като статистически достоверно различие се доказва по азотните показатели N_K и NH_4-N . При НВ, БПК₅ и ХПК нулевата хипотеза не се отхвърля, т.е. не се доказва статистически достоверно различие между средните стойности на входните концентрации при условните режими НН и ВН. Все пак този резултат задоволява задачите на изследването, което в тази група експерименти се съсредоточава изключително върху нитрификацията.

6.2.2.2. Ефект на пречистване

Таблица 6.15 представя качествените параметри на отпадъчната вода на входа и изхода на Колона 1 и Колона 2 при степен на аерация II. Фигура 6.8 илюстрира качествените параметри на отпадъчната вода за Колона 2, която показва с 10 до 40 % по добър ефект от Колона 1. Средните стойности на ефектите на пречистване по основните показатели са отразени в таблица 6.16.

По отношение на изходните концентрации резултатите от успоредните проверки на хипотези по непараметричните и параметричните статистически методи показва право пропорционално съответствие с резултатите от проверките при входните данни, т.е. достоверно различие между изходните редици на концентрациите при режимите НН и ВН се доказва само по N_K и NH_4-N . Следователно за разлика от другите процеси степента на нитрификация остава чувствителна към промяната на входното натоварване в естествени условия въпреки повишаването на аерацията.

Табл. 6.15 Резултати от пречистване с нитрификация - степен на аерация II (6 l/min)

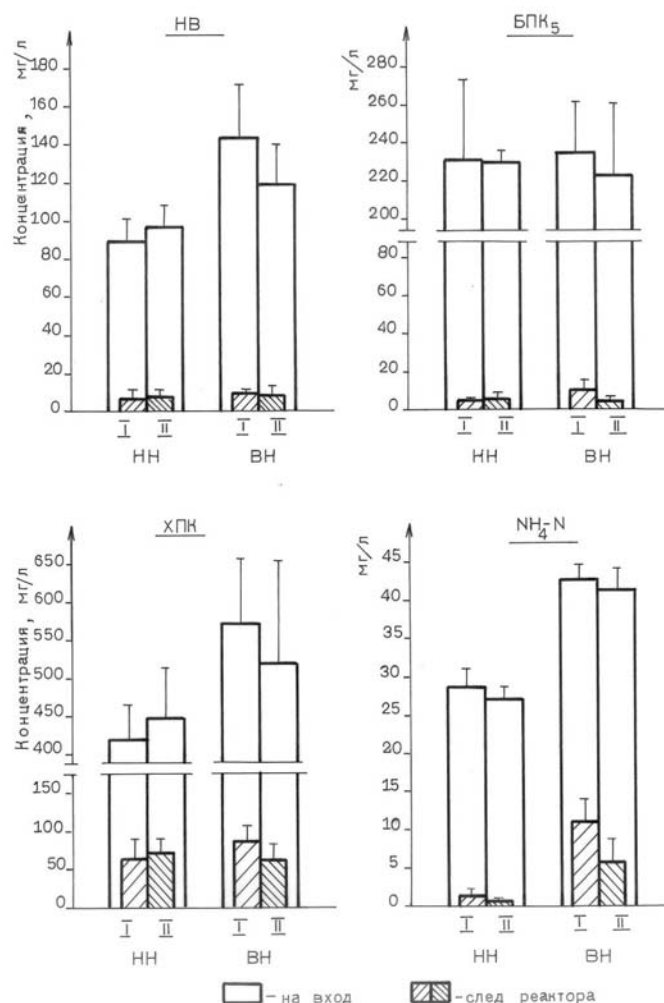
		НВ mg/dm ³	БПК ₅ mg/dm ³	ХПК mg/dm ³	N_K mg/dm ³	NH_4-N mg/dm ³	NO_3-N mg/dm ³	NO_2-N mg/dm ³
НН	Вход	96,2*	229,6	448,9	32,9	27,2	0,470	0,060
	Колона 1	14,7	12,1	91,4	6,5	3,4	8,9	1,123
	Колона 2	8,0	5,7	70,9	2,0	0,6	12,7	0,785
ВН	Вход	118,8	222,2	519,7	48,4	41,5	0,456	0,078
	Колона 1	9,5	7,4	72,5	12,1	11,0	12,4	3,310
	Колона 2	8,1	4,2	60,8	6,8	5,7	19,0	3,563
Наредба 6		35	25	125		10-15		
Наредба 7 за II кат. реки (отм.)		50	15	70		2,0	10	0,04
Наредба Н-4		-	4	-	-	0,3	2	0,06

* - средни стойности ; n=2- 4 (брой проби)

Табл. 6.16. Ефект на пречистване по основните показатели при аерация II (средни стойности)

	Реактор	Пречиствателен ефект, %			
		НВ	БПК ₅	ХПК	NH_4-N
НН	Колона 1	84,2	94,6	78,4	87,3
	Колона 2	91,4	97,5	85,2	97,8
ВН	Колона 1	90,5	96,2	87,8	73,6
	Колона 2	92,8	98,0	88,9	86,2

Бел: Колона 1 – гранулиран пълнеж; Колона 2 – трошен пълнеж



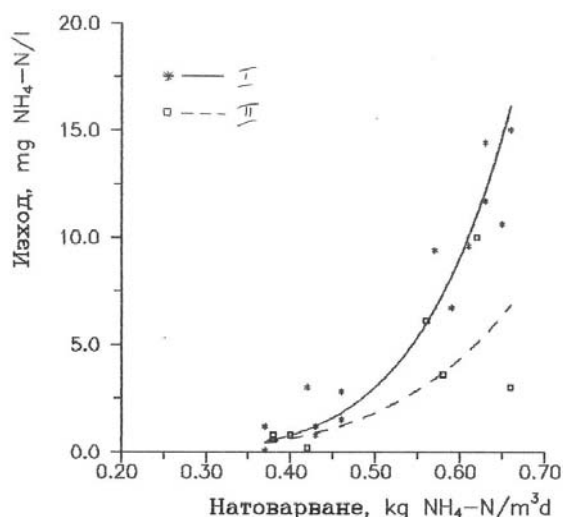
Фиг. 6.8. Входни и изходни концентрации на замърсявания за Реактор 2 (ср. ст. и станд. откл.; I и II - степени на аерация)

6.2.3. Сравняване на резултатите от двете групи експерименти

Проверката на хипотези не доказва статистически значимо различие между съответните редици от входни концентрации за I и II степени на аерация. Това дава основание за директно сравняване на редиците от изходни стойности за оценяване на технологичната ефективност от повишаването на количеството подаден въздух.

При наблюдаваното по-слабо замърсяване на входа (режим HH) промените в степента на аерация в приложените граници (повишаване 1,5 пъти) не се отразяват чувствително върху изследваните качествени показатели. Повишаването на количеството на кислорода при режим HH се отразява чувствително само върху концентрациите на нитритния азот ($\text{NO}_2\text{-N}$). Средните стойности на $\text{NO}_2\text{-N}$ се понижават 1,7 пъти. Следователно при тези условия количеството на кислорода е достатъчно и не е лимитиращ фактор.

Повишаването на количеството на кислорода при режим BH се отразява най-значително върху $\text{NH}_4\text{-N}$, чиято концентрация намалява 2 пъти в сравнение с тази при същия режим на натоварване и аерация I (фиг. 6.9).



Фиг. 6.9. Изходни стойности на амониевия азот в зависимост от натоварването при степени на аерация I и II ($\Pi=1,5 I$)

Количеството на нитритния азот не се променя, но нитратният ($\text{NO}_3\text{-N}$) се увеличава 1,4 пъти. Показателите НВ и ХПК се оказват по-нечувствителни към измененията в степента на аерацията в режима ВН.

Аналогично се повлияват и ефектите на пречистване. Повишената степен на аерация показва подобряване на ефекта на пречистване предимно по амониев азот. В абсолютно изражение ефектът се повишава в сравнение с този при I група експерименти, като това е по-значително при високото натоварване – повишаване с 12 % и средна стойност 86,2 % . В режима на по-ниско натоварване НН повишаването на количеството кислород подобрява ефекта по отношение на амониевия азот по-незначително - с 3 %, като постигнатата средна стойност в абсолютно изражение е много висока - 97,8 % .

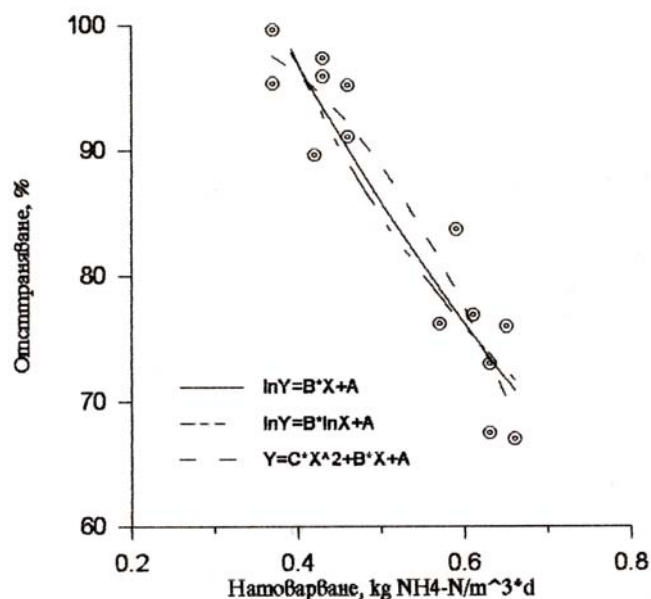
Отстраняването на биоразградимите органични вещества се засяга в по-ниска степен от промяната в количеството на доставяния въздух. В режима ВН повишаването на степента на аерация подобрява средно с 2,2 % ефекта по БПК₅, който достига 98%.

Статистическото сравняване на редиците от данни за двете степени на аерация I и II показват идентични резултати. При изходните концентрации нулевата хипотеза с двустранна критична област се отхвърля за амониевия азот и БПК₅ в режима ВН, а за останалите параметри тя е валидна, т.е. при тях не се доказва статистически достоверна разлика при двете степени на аерация. При анализа на съответните извадки (I) и (II) не се доказва статистически значима разлика между средните стойности на общия окислен азот ($\text{NO}_x\text{-N}$) за редици I и II в режим НН, но при ВН изчисленията доказват статистическа значимост на разликата.

6.2.4. Регресионен анализ

Регресионните зависимости между изходните концентрации на амониевия азот и съответното входно натоварване при двете степени на аерация са нелинейни (фиг. 6.9). Степенната функция дава малко по-висок коефициент на детерминация и по-ниска остатъчна дисперсия.

Изследвана е и зависимостта между ефекта на отстраняване на амониевия азот и входното натоварване, дадена на фиг. 6.11.



Фиг. 6.11. Регресионни зависимости между ефекта на отстраняване на $\text{NH}_4\text{-N}$ и обемното натоварване (аерация I, Реактор 2)

От 4 модела подходящи се оказват експоненциалната и степенната функции. Уравненията им с оценените по метода на най-малките квадрати параметри имат вида:

$$Y = 156,562e^{-1,20118X} \text{ с остатъчна дисперсия } s_2^2 = 0,002782 \quad (6.9)$$

и

$$Y = 55,8936X^{-0,600484} \text{ с остатъчна дисперсия } s_2^2 = 0,003239. \quad (6.10)$$

6.3. Обобщение и изводи за технологичната ефективност на потопените аерирани биологични филтри за нитрификация

1) Изследваните потопени аерирани филтри с прикрепена биомаса отстраняват в значителна степен неразтворените вещества (НВ), органичната материя и амониевия азот, като качеството на пречистената отпадъчна вода отговаря или превишава нормите. Средният ефект на пречистване е 93 % по НВ, 98 % по БПК₅, 95% по $\text{NH}_4\text{-N}$ и 49 % по общ азот при обемно натоварване 0,42 $\text{kg NH}_4\text{-N/m}^3\text{d}$ и 3,35 $\text{kg БПК}_5/\text{m}^3\text{d}$. Последното е двойно по-голямо органично натоварване от това при постигащите същия резултат традиционни биобасейни и капещи биофилтри. Това предопределя по-голяма компактност на изследваните реактори в сравнение с класическите.

2) Повишаването на замърсяването на входната отпадъчна вода по основните показатели засяга незначително отстраняването на НВ и ефекта по ХПК, където действието на реакторите е стабилно, но се отразява забележимо върху биологичните процеси в реакторите и върху ефекта на пречистване по БПК₅. Най-чувствителен към дневните вариации на входното замърсяване е процесът на биологична нитрификация, където при натоварване 0,62 $\text{kg NH}_4\text{-N/m}^3\text{d}$ ефектът на пречистване пада до 74 %.

3) По-голямата специфичната повърхност, респ. порестост на трошения пълнеж в сравнение с гранулирания не се отразява значимо върху степента на отстраняване на органичните вещества (изразени като БПК₅ и ХПК), но е от благоприятно значение за

по-добрия ефект на пречистване по NH и $\text{NH}_4\text{-N}$. По отношение на последния това се проявява до определени граници на входното натоварване, над които статистически достоверни различия между резултатите за двата изследвани реактора се забелязват само за показателя NH .

4) Горните резултати биха могли да се използват на практика при избор на подходящ от технико-икономическа гледна точка пълнеж в зависимост от качеството на суровата отпадъчна вода и изискванията за степента на пречистването ѝ, както и за конструиране на реактор с двуслоен пълнеж, който да комбинира в оптимална степен по височината си положителните технологични характеристики на всеки от двата материала.

5) Увеличаването на количеството на подавания въздух 1,5 пъти не се отразява значимо върху изходните стойности на NH , BPK_5 , ХПК , амониев, нитратен и общ окислен азот при по-ниското натоварване по замърсяване, защото явно няма кислороден дефицит и ефектите на пречистване са достатъчно високи – например 98 % по $\text{NH}_4\text{-N}$. При режима на по-високо азотно натоварване повишената аерация подобрява практически и статистически значимо качеството на пречистената отпадъчна вода по $\text{NH}_4\text{-N}$ (среден ефект 86 % или повишаване на степента на отстраняване с 12 %) и общ окислен азот, като нитратния азот нараства 1,4 пъти. Статистически значима е и разликата за BPK_5 (ефект на пречистване 98%). Показателите NH и ХПК се оказват по-нечувствителни към измененията в степента на аерацията при по-високото натоварване.

6) Тъй като изследването е проведено в естествени условия на денонощна неравномерност на входното натоварване, тези резултати биха могли да се използват за повишаване на енергийната ефективност посредством оптимизиране на схемата на аерация с вариации в количеството на подавания въздух, съответстващи на измененията на входното замърсяване.

7) Регресионният анализ установява, че зависимостите между входното натоварване по замърсяване и изходните концентрации, респективно ефекти на пречистване за $\text{NH}_4\text{-N}$, се апроксимират най-добре със степенни и експоненциални функции. От тези зависимости по изчислителен път може да се установи, че при ниското натоварване изходните концентрации почти не се влияят от него и са под 2 mg/dm^3 , но при нарастване на входното натоварване качеството на водата на изхода се влошава значително.

8) Предложената методика с алгоритъм за статистическа обработка и анализ на опитните данни улеснява оценяването на технологичната ефективност на изследваните реактори при променящи се условия, защото предлага точни математически критерии. С това се подпомага приложимостта на експерименталните резултати и се подобряват възможностите за вземане на технически решения и проектиране.

В заключение може да се обобщи, че потопените аерирани биологични филтри могат да бъдат добра алтернатива на традиционните съоръжения при проектиране на нови и реконструкция на съществуващи селищни пречиствателни станции с ограничена застроителна площ или да служат за нитрифициращо стъпало при предявени изисквания за допълнително пречистване на градските отпадъчни води от азот.

Изследвания за комбинираното прилагане на процесите нитрификация-денитрификация за отстраняване на азота от градски отпадъчни води са описани в следващата глава 7 от дисертационния труд.

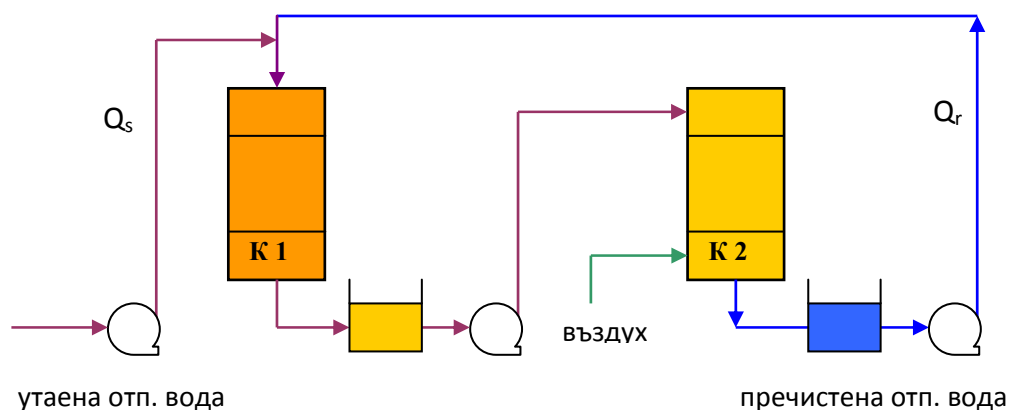
7. ОЦЕНКА НА ЕФЕКТИВНОСТТА НА ПОТОПЕНИ БИОЛОГИЧНИ ФИЛТРИ ЗА ОТСТРАНЯВАНЕ НА АЗОТА ЧРЕЗ НИТРИФИКАЦИЯ И ДЕНИТРИФИКАЦИЯ СЛЕД ПЪРВОТО СЪТЪПАЛО НА ГРАДСКА ПСОВ

В настоящата глава е описано комбинираното прилагане на процесите нитрификация и денитрификация за отстраняване на азотните съединения от градски отпадъчни води. Първият аспект на изследването е определяне на влиянието на величината на хидравличното натоварване и натоварването по замърсяване върху ефекта на пречистване в комбинация с допречистване от азот, както и определяне на оптималното рециркуляционно отношение за системата. Вторият аспект на изследването е извършване (посредством предложената теоретична методика и резултатите от предишните етапи на изследване) на сравнителен анализ на действието на нитрификационния реактор в двете му състояния – пречистване само с нитрификация и пречистване с нитрификация в комбинация с втори реактор за денитрификация.

7.1. Материали и методи

Физическите експерименти са продължение на описаните в предишната Глава 6 и са проведени на пречиствателната станция за отпадъчни води на град Рединг, Англия

Експерименталният модел се състои от две пластмасови колони с вътрешен диаметър 152 mm, обща височина 2,20 m и порест пълнеж от експандирана глина с височина 1,70 m. За да се завърши процесът на отстраняване на азота, опитната инсталация е модифицирана така, че двете колони да работят не успоредно, а последователно. Тъй като при предишните експерименти (само за нитрификация), Колона 1 (гранулиран материал) показва по-ниска технологична ефективност, в настоящите изследвания тя действа като потопен безкислороден (аноксичен) биофилмов реактор за редукция на окисления азот (денитрификация). Колона 2 (трошен материал) продължава да работи като потопен аериран биологичен филтър (биореактор) за окисляване както на органичните вещества, така и на амониевия азот (нитрификация).



Фиг. 7.1 Схема на експерименталната инсталация за нитрификация-денитрификация в потопени биологични филтри

К1 – денитрификатор ; К2 – нитрификатор;

Q_s – входно количество утаена вода; Q_r – рециркуляционно количество пречистена вода

Към безкислородния денитрификационен реактор (Колона 1) се подава отпадъчна вода, взета от изхода на първичните утайтели на градската пречиствателна станция. Оттокът от денитрификатора преминава през аерирания нитрификационен реактор (Колона 2), след което част от пречистената вода се рециркулира, а останалата се отправя към водоприемника (фиг. 7.1).

В началото количеството на утаената отпадъчна вода, подавано към системата, е $Q_s = 0,25 \text{ dm}^3/\text{min}$, но основните експерименти са проведени при количество $Q_s = 0,3 \text{ dm}^3/\text{min}$, еквивалентно на хидравлично натоварване от $1 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ – същото както при опитите само за нитрификация, описани в Глава 6. Органичните вещества във входния поток служат като въглероден източник за хетеротрофните бактерии, които осъществяват денитрификацията в Колона 1 на рециркулиращия нитрифициран отток от Колона 2. Към последната се подава въздух с количество $Q_{\text{въз}} = 4 \text{ dm}^3/\text{min} = 13,3 \text{ m}^3/\text{m}^3$ отпадъчна вода, аналогично на I-та група експерименти в Глава 6. Експериментът започва при рециркуляционно отношение $r = 0$, след което r нараства последователно от 1 до 3 пъти.

Пробите се взимат по едно и също време следобед по схемата на експериментите за нитрификация, описани в Глава 6. За да се поддържат сравними условия, обратната промивка на филтърните колони за отстраняване на излишната биомаса и задържаните неразтворени вещества се извършва ежедневно след взимане на пробите.

Пробите от входа и изхода на реакторите са анализирани по стандартни и специални методики по показателите температура, рН, разтворен кислород, неразтворени вещества (НВ), БПК₅, ХПК, общ азот по Келдал (N_k), амониев (NH₄-N) -, нитритен (NO₂-N) - и общ окислен (NO_x-N) азот.

С помощта на статистически критерии по методиката на изследване, описана в Глава 4, са отстранени някои от стойностите, които се различават твърде много от останалите, и са намерени основните параметри на редиците от опитни данни. За извеждане на зависимости се използват методите на регресионния анализ за еднофакторни модели.

Въз основа на получените експериментални и изчислителни резултати е направена оценка на технологичната ефективност на изследваната система от потопени биологични филтри в зависимост от изменението на рециркуляционното отношение.

7.2 Резултати и обсъждане

7.2.1. Действие на системата за нитрификация-денитрификация

7.2.1.1. Условия на средата

В таблица 7.1 са отразени средните стойности на някои важни фактори на средата, в която се протичат биохимичните процеси.

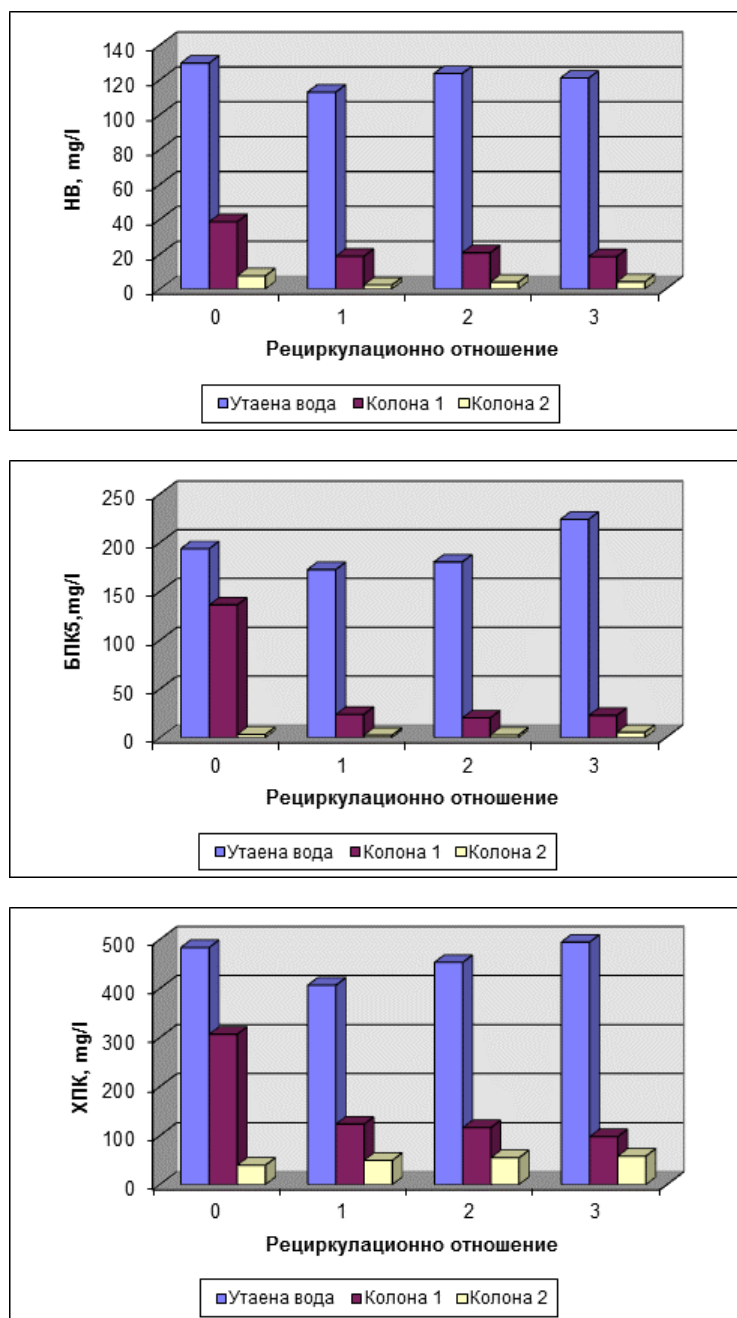
Табл. 7.1 Условия на средата при нитрификация-денитрификация (средни стойности)

r	рН			Р-рен O ₂			Температура		
	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2
	-	-	-	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	°C	°C	°C
0	7,82	7,52	7,76	0,4	0,1	2,9	14,8	13,9	13,7
1	7,98	8,06	7,96	0,7	0,7	4,1	14,4	13,3	13,5
2	8,20	8,06	7,76	1,1	0,9	3,8	14,3	12,1	12,0
3	8,00	7,99	7,76	0,7	0,9	4,0	13,4	11,1	11,1

В дисертацията е анализирана динамиката на биохимичните процеси по изменението на стойностите на рН.

7.2.1.2. Ефект на пречистване

При промяна на рециркуляционното отношение от 1 до 3 в системата от безкислороден и аериран биологични филтри стойностите на концентрациите по НВ, БПК₅ и ХПК на изхода на всеки от реакторите остават практически постоянни и ниски, което показва, че има потенциал за справяне и с по-високо обемно органично натоварване (фиг. 7.3 и табл. 7.2).



Фиг. 7.3. Средни концентрации на неразтворените вещества, БПК₅ и ХПК на входа на системата, след Колоната 1 (денитрификация) и след Колоната 2 (нитрификация)

Табл. 7.2. Концентрации на НВ, БПК₅ и ХПК в системата нитрификатор-денитрификатор

г	НВ			БПК ₅			ХПК		
	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2	Утаена вода	Колоната 1	Колоната 2
	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
0	129,5	38,5	7,5	193,6	136	3,2	483,3	306,5	39,6
1	112,8	18,7	2,2	172,2	23,7	2,3	406,4	123,3	49,2
2	123,5	20,7	3,9	180	20,1	2,6	453	116,1	54,6
3	120,9	18,5	4,1	223,7	22,7	5,4	494,3	97,6	57,9

Бел: Дадени са средни стойности; n = 5÷8 (брой проби)

Двата биофилмови реактора изпълняват ролята и на физикохимични филтри от типа на експериментирания в Глава 5. Това е ясно изразено при нулевото рециркуляционно отношение, където първото стъпало на системата - безкислородният реактор К1, задържа средно до 70% от неразтворените вещества (фиг. 7.3 и табл. 7.3). При рециркулацията на част от оттока от К2 концентрациите на органичните вещества след аноксичния реактор К1 намаляват още повече поради консумацията им от хетеротрофните микроорганизми за осъществяване на денитрификацията.

Табл. 7.3. Объемно натоварване и ефект на пречистване за Колоната 1 (денитрификация)

Qs	г	Обемно натоварване			Ефект на пречистване			
		БПК ₅	ХПК	NO _x -N	НВ	БПК ₅	ХПК	NO _x -N
l/min	-	kg/m ³ d	kg/m ³ d	kg/m ³ d	%	%	%	%
0,25	0	2,38	5,15	0,01	55,5	14,4	22,3	47,6
0,25	1	2,06	5,00	0,15	63,2	51,5	39,6	91,5
0,3	0	2,68	6,09	0,01	70,2	30,0	29,9	47,8
0,3	1	2,43	5,87	0,18	68,0	72,9	46,6	92,0
0,3	2	2,59	7,47	0,29	52,7	66,9	34,0	92,5
0,3	3	3,37	9,48	0,28	42,0	61,9	41,6	89,5

Амониевият азот се отстранява частично още в безкислородния реактор К1 при рециркулация, макар, че там не протича нитрификация (фигура 7.4). Това може да се обясни с асимилативни процеси в прикрепения биофилм, аналогично на случая при профила на отстраняване на NH₄-N по височина на колоната от експериментите, описани в Глава 6. При средно обемно натоварване по амониев азот от 0,38 до 0,48 kg/m³d степента на отстраняването на NH₄-N в Реактор 2 е много висока и се колебае в тесни граници - средно 97,6 - 98,6 % (табл. 7.4).

Табл. 7.4. Объемно натоварване и ефект на пречистване за Колоната 2 (нитрификация)

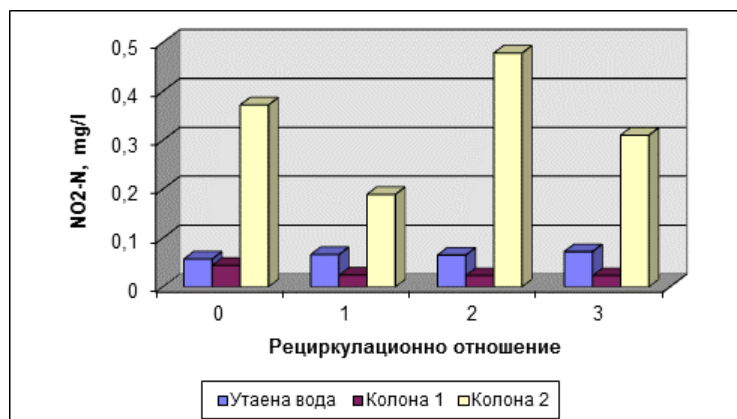
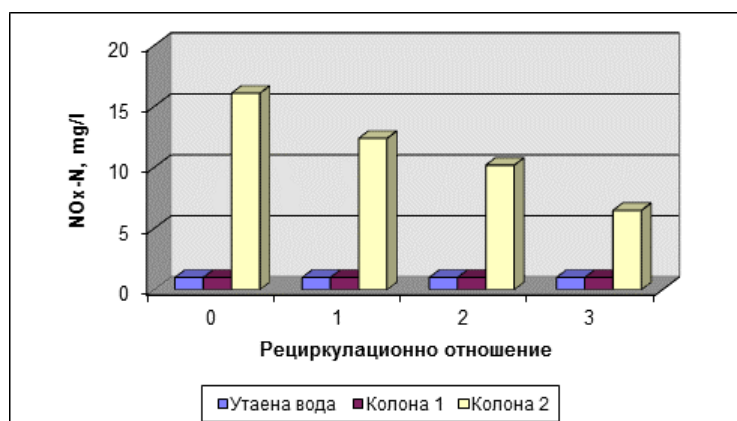
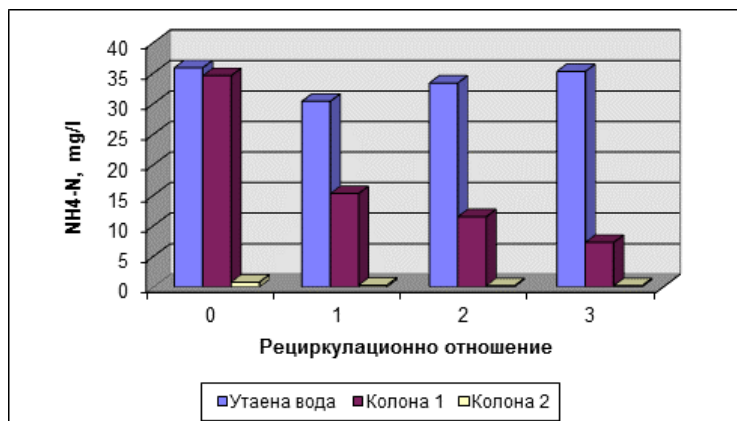
Qs	г	Обемно натоварване				Ефект на пречистване			
		БПК ₅	ХПК	N _K	NH ₄ -N	НВ	БПК ₅	ХПК	NH ₄ -N
l/min	-	kg/m ³ d	kg/m ³ d	kg/m ³ d	kg/m ³ d	%	%	%	%
0,25	0	2,03	3,99	0,46	0,40	91,4	97,9	79,6	98,6
0,25	1	0,97	2,91	0,43	0,38	85,3	93,0	62,8	98,6
0,3	0	1,92	4,32	-	0,48	80,4	97,5	87,4	97,6
0,3	1	0,66	3,44	-	0,43	85,8	90,3	51,7	97,8
0,3	2	0,85	4,88	-	0,48	79,4	85,4	51,7	98,1
0,3	3	1,26	5,42	-	0,41	78,1	74,1	42,1	97,9

Средните стойности на изхода са в диапазона 0,2 ÷ 0,8 mg NH₄-N /dm³ (табл. 7.5), а абсолютните падат и под 0,1 mg/dm³.

Табл. 7.5. Концентрации на азота в системата нитрификатор-денитрификатор

r	NH ₄ -N			Nox-N			NO ₂ -N		
	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2	Утаена вода	Колона 1	Колона 2
	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³	mg/dm ³
0	35,9	34,6	0,8	< 1	< 1	16,1	0,057	0,044	0,372
1	30,4	15,3	0,3	< 1	< 1	12,4	0,066	0,024	0,189
2	33,4	11,5	0,2	< 1	< 1	10,2	0,065	0,023	0,478
3	35,3	7,3	0,2	<1	< 1	6,5	0,072	0,023	0,31

Бел: Дадени са средни стойности; n = 5÷8 (брой проби)



Фиг. 7.4. Средни концентрации на азота в системата

По отношение на окисления азот денитрификационният реактор има по-голям потенциал за пречистване в сравнение с използвания в експериментите. Това се доказва от факта, че концентрациите на остатъчния общ окислен азот $\text{NO}_x\text{-N}$ на изхода на Колона 1 са винаги под точността на химичния аналитичен метод от $1,0 \text{ mg/dm}^3$.

Прави впечатление необичайно високият процент ($\sim 50\%$) отстраняване на азота в нитрификационната Колона 2, което се очертава най-ясно при нулево рециркуляционно отношение. Това може да се обясни с възможен процес на денитрификация в биофилма, тъй като при дебел биофилм само повърхностният слой е аеробен, а долният е безкислороден.

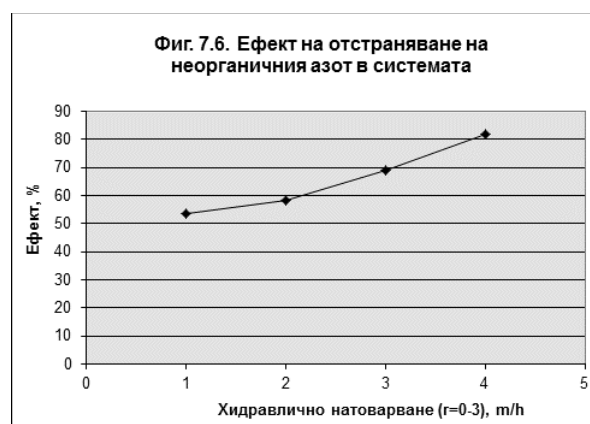
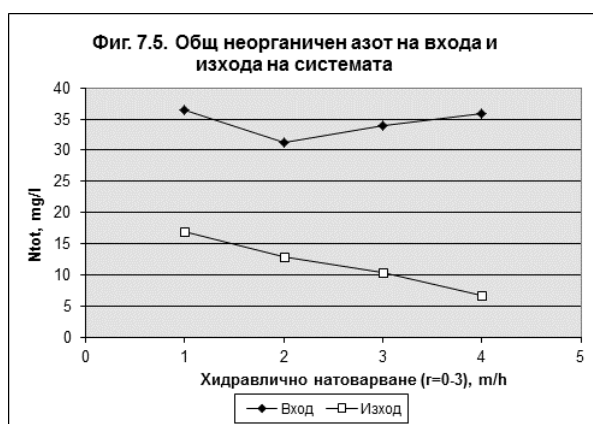
Увеличаването на рециркуляционното отношение подобрява отстраняването на азота в системата. При рециркуляционно отношение $r=3$ и хидравлично натоварване 4 m/h средната концентрация на общия окислен азот в пречистената вода е $6,5 \text{ mg/dm}^3$, а на общия неорганичен азот достига стойност $6,7 \text{ mg/dm}^3$ (табл. 7.5) при ефект на отстраняване $81,7\%$. Ефектът на пречистване по общ азот е още по-голям (табл. 7.6). Следователно опитните резултати за азота при рециркуляционно отношение 3 удовлетворяват изискванията на Директивата на Европейския съюз за градските отпадъчни води и на Наредба 6, определяща емисионните норми за отпадъчните води от селищните пречиствателни станции.

Таблица 7.6. Отстраняване на азота в системата за нитрификация-денитрификация

Q_s	Q	r	v_f	Общ азот			Общ неорг. азот		
				Вход	Изход	Ефект	Вход	Изход	Ефект
l/min	l/min	-	m/h	mg/dm^3	mg/dm^3	%	mg/dm^3	mg/dm^3	%
0.25	0.25	0	0.8	44.6	18.2	59.7	37.2	16.4	56.3
0.25	0.5	1	1.6	40.5	13.4	67.3	34.3	12.5	63.9
0.3	0.3	0	1.0	-	-	-	36.4	17.0	53.6
0.3	0.6	1	2.0	-	-	-	31.2	12.8	58.3
0.3	0.9	2	3.0	-	-	-	33.9	10.4	69.2
0.3	1.2	3	4.0	-	-	-	35.8	6.7	81.7

r – рециркуляционно отношение; v_f – скорост на филтрация (хидравлично натоварване)

Фигури 7.5 и 7.6³ показват нагледно резултатите по отношение на отстраняването на общия неорганичен азот.



³ Коригирано след установено дублиране на фиг. 7.5 за сметка на фиг. 7.6.

7.2.2. Сравнение между технологичните ефективности на нитрификатора като самостоятелен реактор и в комбинация с денитрификатор

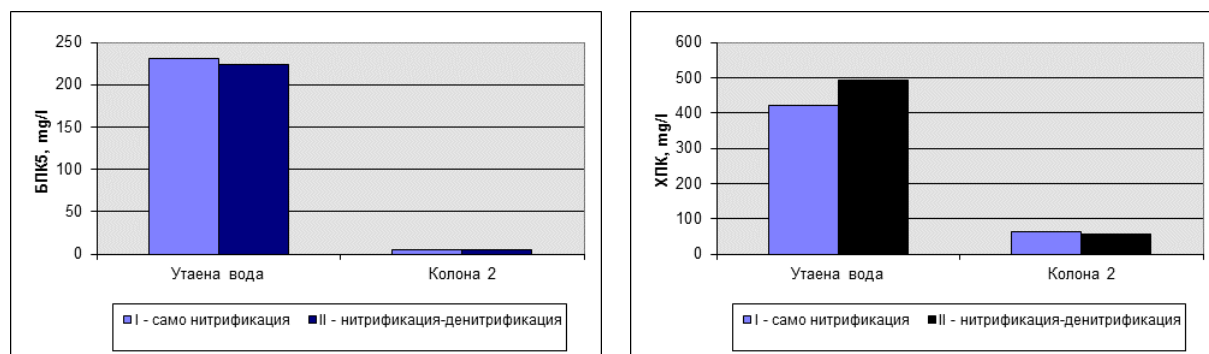
За сравняването се използват резултатите при рециркуляционно отношение $r=3$ от настоящата Глава 7.

Сравняването на резултатите по отношение на входа на цялата система и изхода на Колона 2 показва, че НВ, БПК₅ и ХПК не се повлияват чувствително от променената технологична схема, като ефектът на пречистване и в двата вида експерименти е висок (табл. 7.7 и фиг. 7.7)

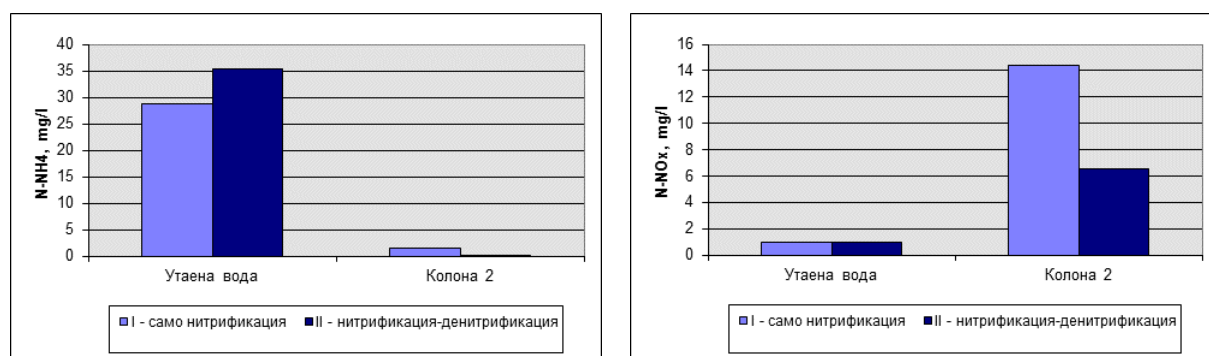
Табл. 7.7. Отстраняване на замърсителите от Колона 2 при различните експерименти*

Процес	НВ		БПК ₅		ХПК		NH ₄ -N		Nox-N	
	Утаен вода	Кол. 2	Утаен вода	Кол. 2	Утаен вода	Кол. 2	Утаен вода	Кол. 2	Утаен вода	Кол. 2
Само нитрификация	89,3	6,5	230,5	4,4	420,8	63,6	28,8	1,4	1	14,4
Нитриф.-денитриф.**	120,9	4,1	223,7	5,4	494,3	57,9	35,3	0,2	1	6,5

*- средни стойности, mg/dm³ ; ** $r=3$



Фиг. 7.7. Средни стойности на БПК₅ и ХПК на вход и изход на системата при прилагане само на нитрификация и при комбинирана нитрификация-денитрификация

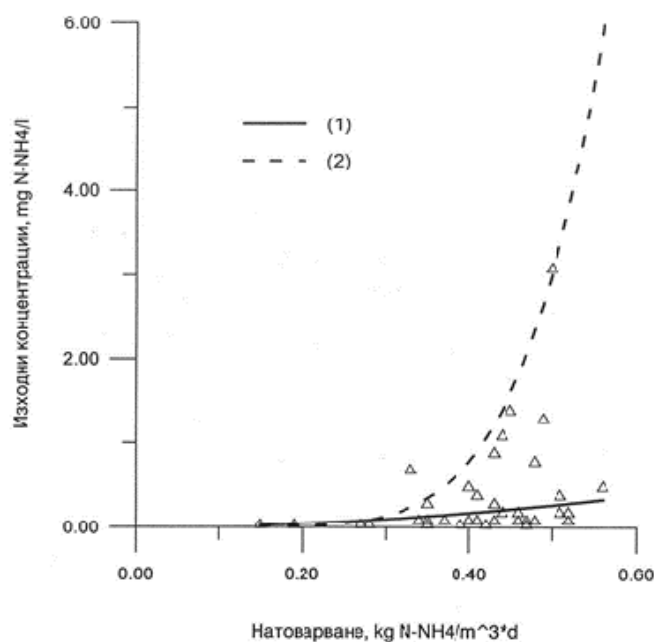


Фиг. 7.8 Стойности на NH₄-N и на NO_x-N на вход и изход на системата при прилагане само на нитрификация и при комбинирана нитрификация-денитрификация

По отношение на формите на неорганичния азот обаче системата от нитрификатор-денитрификатор постига повече от два пъти по-добро пречистване в сравнение с едностепенната схема само с нитрификация (табл. 7.7 и фиг.7.8). В същото време нарастването на общия обем на съоръженията би било по-малко от два пъти поради по-големия пречиствателен потенциал на безкислородния реактор.

При изследваното обемно натоварване по замърсяване концентрациите на амониев и нитритен азот в пречистената вода са много по-ниски в сравнение с експериментите по едностепенна схема (само с нитрификация). Това очевидно се дължи на аноксичния реактор, който отстранява част от органичните вещества и по този начин облекчава нитрификацията, тъй като е известно, че в конкуренцията между хетеротрофните и автотрофните аеробни микроорганизми последните са по-уязвими.

Горното заключение се потвърждава и от регресионния анализ на зависимостта между изходните концентрации и входното обемно натоварване по амониев азот за Колона 2 (фиг. 7.9).



Фиг. 7.9. Криви на регресия между входното обемно натоварване и изходната концентрация на $\text{NH}_4\text{-N}$ за Колона 2

- (1) – при нитрификация след денитрификационната Колона 1 (ф-ла 7.1)
 (2) – при самостоятелно пречистване с нитрификация (ф-ла 6.11)

Установеното в предишния етап на изследване (само нитрификация) уравнение за крива I на фиг. 6.9 в Глава 6 е степенната функция (6.11). При комбинирано прилагане на процесите нитрификация-денитрификация, съчетано с частично отстраняване на органичната материя в безкислородния реактор, адекватният модел също се изразява със степенна функция – съответно (7.1)

$$Y = 197,617X^{6,03462} \quad \text{със } s_2^2 = 0,4270 \quad (6.11)$$

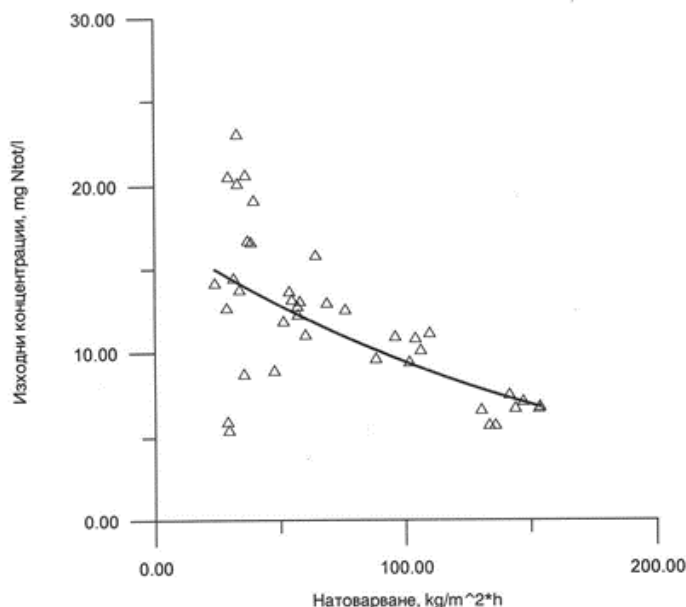
$$Y = 0,6541X^{1,5922} \quad \text{със } s_2^2 = 0,8435 \quad (7.1)$$

Стойностите на параметрите на уравнение (7.1) обаче са много по-малки в сравнение с тези в уравнение (6.11), защото нитрификацията в този случай не се инхибира и дава по-ниски стойности на амониевия азот на изхода при същото входно натоварване.

Зависимостта между концентрациите на общия неорганичен азот на изхода на системата от два реактора и повърхностното натоварване по същия показател на входа

на системата, изчислено като $\text{kg N}_{\text{tot}}/\text{h.m}^2$ от напречното сечение на реакторите, се описва най-добре с експоненциалната функция (7.2), която дава най-голям коефициент на детерминация (респ. корелационен коефициент) и минимална остатъчна дисперсия (фиг. 7.10):

$$Y = 17,3515e^{-0,00607999X} \quad \text{със } s_2^2 = 0.0916 \quad (7.2)$$



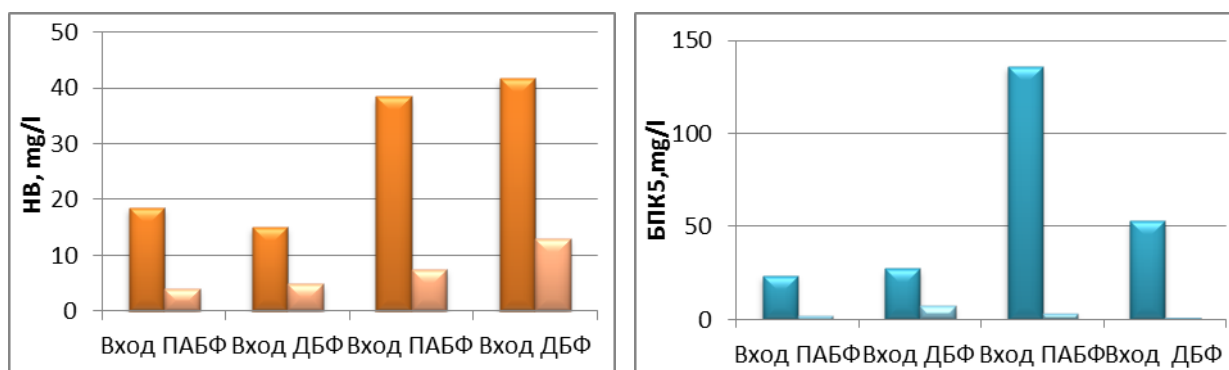
Фиг. 7.10. Крива на регресия между входното повърхностно натоварване по общ неорганичен азот и изходната му концентрация за системата от два реактора

С увеличаване на r входното повърхностно натоварване нараства, но намаляват входните концентрации на амониевия азот поради разреждането и ефективността на отстраняване на общия неорганичен азот нараства (табл. 7.6). Това означава, че определящи за процеса са концентрациите, а не хидравличното натоварване в изследвания диапазон.

7.2.3. Сравнение между технологичната ефективност на третичния двуслоен бърз филтър и нитрификационния филтър в двустепенната схема за допречистване от азот

Ефективността на потопения аериран биологичен филтър (ПАБФ) – т.е. Колона 2 от експериментите с двустепенна схема, описани в настоящата глава 7, е сравнена и с резултатите от действието на двуслойния пясъчно-керамзитов бърз филтър (ДБФ) за третично пречистване, описан в Глава 5. Основанията за такова съпоставяне (въпреки разликите в конфигурацията на пълнежите, във входните стойности на БПК₅ и аерацията), са конструктивната прилика между двете съоръжения, подобие то на вида пълнежи – експандирана трошена глина с много близък зърнометричен състав, близкото входно натоварване по НВ и близкото хидравлично натоварване, подобие то в местоположението в технологичната схема – трето по функция съоръжение, с цялата условност на това понятие по отношение на ПАБФ.

Може да се направи изводът, че ПАБФ (нитрификационна Колона 2) постига същата и по-добра степен на пречистване по НВ и особено БПК₅ от бързия филтър за третично пречистване (фиг. 7.11).



Фиг. 7.11. Средни концентрации на НВ и БПК₅ при ПАБФ и ДБФ

Може да се заключи, че технологична схема за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води от НВ, БПК₅ и азот от вида:

Първичен утаител - Потопен безкислороден биологичен филтър (ПББФ) – Потопен аеробен биологичен филтър (ПАБФ)

има същата или по-добра технологична и най-вероятно по-добра икономическа ефективност (нужен е финансов анализ), от схемата:

Първичен утаител – безкислороден биобасейн– аеробен биобасейн – вторичен утаител – третичен филтър.

7.3. Изводи от изследванията при двустепенна схема с потопени биологични филтри за нитрификация и денитрификация

1) При проведените полупромишлени експерименти е постигнато ефективно биологично отстраняване на органичните вещества и азота (чрез нитрификация и денитрификация) от градски отпадъчни води. Във всички експерименти стойностите на концентрациите на неразтворени вещества (НВ), БПК₅ и ХПК в пречистената вода са устойчиво ниски, като отговарят на нормите.

2) Първата степен – безкислородният денитрификационен биологичен реактор, влиза в ролята и на физикохимичен филтър, подобен на описаните в Глава 5 третични филтри и задържащ средно до 70 % от НВ. Това облекчава нитрификацията в следващия – потопен аериран биологичен филтър (ПАБФ), и повишава значително ефекта на пречистване по амониев азот (NH₄-N).

3) При промяна в рециркуляционното отношение от 1 до 3 концентрациите по НВ, БПК₅ и ХПК на изхода на всеки от реакторите остават непроменени, което показва, че има потенциал за справяне и с по-високо обемно органично натоварване.

4) Увеличаването на рециркуляционното отношение подобрява отстраняването на азота в системата. При $r=3$ и хидравлично натоварване $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$ средната концентрация на неорганичен азот достига стойност $6,7 \text{ mg/dm}^3$ при ефект на отстраняване 82 %. Това задоволява изискванията на Директивата на ЕС относно пречистването на градски отпадъчни води.

5) В системата за нитрификация и денитрификация безкислородният биологичен филтър може да поеме по-голямо хидравлично натоварване в сравнение с аерирания реактор. В практиката това може да се постигне чрез по-малък брой филтърни клетки

от тези за нитрификационното стъпало при реконструкция на съществуващи пречиствателни станции или с проектиране на по-малък обем на съоръжението при изграждане на нови станции.

6) Сравняването на резултатите от експериментите с нитрификационния Реактор 2 при едностепенна схема (само нитрификация) и при двустепенна схема (нитрификация-денитрификация) по отношение на концентрациите на входа и изхода на системата показва, че БПК₅ и ХПК не се повлияват чувствително от променената схема на пречистване, като и в двата случая ефектът по тези показатели е много висок.

7) Сравняването на резултатите за НВ и БПК₅ на ПАБФ (Реактор 2) от двустепенната схема с двуслойния бърз филтър за третично пречистване (ДБФ) показва отчетливо предимство на ПАБФ, т.е. той изпълнява ролята едновременно на второ и трето стъпало за пречистване и допречистване, което го прави не само технологично, но и икономически по-ефективен от другите алтернативи.

8) Системата от нитрификатор и денитрификатор постига повече от два пъти по-добро пречистване по азот в сравнение с едностепенната схема само с нитрификация. В същото време нарастването на общия конструктивен обем на системата от два потопени биологични филтъра е по-малко от два пъти, поради по-големия пречиствателен капацитет на безкислородния реактор. Това прави двустепенната схема икономически по-ефективна за единица обем на съоръженията.

8. ОБОБЩЕНИЕ НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОТ ИЗВЪРШЕНИТЕ НАУЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

Дисертационният труд отразява изследвания за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води от въглеродни и азотсъдържащи органични и неорганични замърсители чрез физикохимични и потопени биологични филтри с различни минерални пълнежи.

В различни конфигурации на експерименталните филтърни инсталации е определено влиянието на някои основни технологични параметри, като вида на пълнежите и величината на специфичната им повърхност, хидравличното натоварване и натоварването по замърсяване, степента на аерация и рециркуляционното отношение, върху ефекта на пречистване и допречистване.

Определено е оптималното от технологична гледна точка рециркуляционно отношение в системата за отстраняване на азота от градски отпадъчни води.

Направено е сравнение между технологичната ефективност на изследваните в дисертационния труд различни по роля и място в технологичната схема филтърни системи и са определени предимствата на някои от тях.

Тъй като изследванията са проведени в реални условия, резултатите биха могли да се използват при разработване на проектни варианти за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води с оглед избор на подходящи филтърни пълнежи, определяне на оптимална схема на аерация с вариации в количеството на подавания въздух в съответствие със степента на замърсяване, определяне на оптимално рециркуляционно отношение за денитрификация и др.

Разработената методика с математико-статистически критерии за обработка и анализ на експерименталните данни дава възможност за точен сравнителен анализ и оценка на действието на паралелно работещи съоръжения за пречистване на води при променящи се условия. С това се подпомага практическата приложимост на резултатите и се подобряват възможностите за вземането на ефективни решения при планирането, проектирането и експлоатацията на съоръженията.

Положителните резултати предлагат добра алтернатива на традиционните съоръжения при проектиране на нови и реконструкция на съществуващи пречиствателни станции с ограничена застроителна площ и при повишени изисквания за отстраняване на неразтворените и разтворени органични вещества и азота с оглед на опазване здравето на хората, чистотата на водоприемниците и повторното използване на отпадъчните води.

9. НАУЧНИ И НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

По оценка на авторката дисертационният труд има следните научни и научно-приложни приноси:

1) Предложена е теоретична методика с подобрени критерии от математическата статистика за анализ на малки извадки от данни, и е разработен алгоритъм за прилагането им при изследвания в областта на водоснабдителни и канализационни системи за пречистване на води. За първи път в тази област у нас се прилага подобен подход за анализ, иначе известен в други научни области. За автоматизиране на изчисленията са разработени блок-схема и пакет програми на езика FORTRAN, но при добро познаване на алгоритъма и необходимите условия за прилагането му може да се използват и готови статистически софтуерни продукти.

2) Въведени са нови технологични параметри - „относителна задържаща способност K_v “ и „относителна загуба на напор h_v “, и формули за изчисляването им, което осигурява критерии за сравнимост на резултатите от наблюдения на експериментални или реални филтри за пречистване на води в условия на неравномерно и нееднакво помежду им хидравлично натоварване (без регулатори на филтърна скорост).

3) Теоретичната методика и въведените технологични критерии са приложени за оценка на ефективността на различни видове физикохимични и потопени биологични филтри с минерални пълнежи за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води.

4) За постигане на целите и задачите на дисертационния труд е извършена значителна по обем експериментална дейност. Проведените лабораторни и полупромишлени експерименти в реални условия на две градски пречиствателни станции са достоверен източник на информация с научна и практическа приложимост.

5) Направените експерименти с различни по роля и място в технологичната схема за пречистване и допречистване филтърни системи дават възможност за сравняване на тези системи, което е направено емпирично и теоретично. Определени са предимствата на някои от системите пред други, което може пряко да послужи в практиката при избор между проектни варианти на технологични схеми за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води.

6) С помощта на проведените експерименти са оптимизирани основни технологични параметри на изследваните процеси и съоръжения, които могат да бъдат прилагани в проектантската и експлоатационната практика.

7) Резултатите от изследванията обогатяват българския опит предвид факта, че в практиката у нас все още няма внедрени такива нетрадиционни съоръжения за пречистване и допречистване на градски отпадъчни води.

Списък на публикациите, свързани с дисертационния труд

1. **Ватралова, А.** Отстраняване на азота от градски отпадъчни води в потопени реактори с фиксирана биомаса. - В: *Сборник доклади от 8-ма научнопрактическа конференция на Българска национална асоциация на качество на водите с международно участие "Технологии и управление на качеството на водите в България", София, 19-21 февруари 2003 г., (Eight BNAWQ Scientific and Practical Conference "Water Quality Technologies and Management in Bulgaria", Sofia, 19-21 February 2003)*, 155-162.
2. **Ватралова, А.** Статистически методи и алгоритъм за обработка и анализ на резултати от полупромишлени експерименти за пречистване на градски отпадъчни води. – *Водни проблеми*, **31**, 2001, 72-78. (ISSN 0204-8248)
3. **Ватралова, А.** Експериментално-статистическо изследване на потопени аерирани биологични филтри за пречистване на градски отпадъчни води. - *Водоснабдяване, канализация, пречистване на водата*, 1997, №2, 11-15. (ISSN 1310-795 X)
4. **Ватралова, А.** Отстраняване на органичната материя и амониевия азот от градски отпадъчни води. - *Техническа мисъл*, **33**, 1996, № 3, 58-67. (ISSN 0040-2168)
5. **Ватралова, А.** Потопени аерирани биологични филтри за пречистване на отпадъчни води. - *Техническа мисъл*, **30**, 1993, № 5-6, 47-54. (ISSN 0040-2168)
6. **Ватралова, А.** Пречиствателно действие на различни типове филтърни пълнежи при допречистване на градски отпадъчни води. - *Водни проблеми*, **27**, 1993, 106-111. (ISSN 0204-8248)