



БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО БИОФИЗИКА И БИОМЕДИЦИНСКО ИНЖЕНЕРСТВО

инж. Ваня Красимирова Георгиева

ОБОБЩЕНОМРЕЖОВО МОДЕЛИРАНЕ
НА ПРОЦЕСИ НА ПРЕЧИСТВАНЕ НА ВОДИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд, представен за присъждане на
образователна и научна степен „доктор”

Професионално направление
4.6 „Информатика и компютърни науки”

Научни консултанти

доц. д-р Олимпия Роева

доц. д-р Таня Пенчева

София

2017

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита на разширено заседание на секция “Биоинформатика и математическо моделиране” към Институт по биофизика и биомедицинско инженерство – БАН.

Дисертационният труд включва увод, 6 глави и заключение. Трудът е в обем от 134 страници и съдържа 24 фигури. Библиографията включва 202 заглавия.

Защитата на дисертационния труд ще се състои на2017 г. от ч. в заседателната зала на Институт по биофизика и биомедицинско инженерство – БАН (ул. Акад. Г. Бончев, бл. 105) на открито заседание на Научно жури в състав:

Председател: чл.-кор. проф. дмн дтн Красимир Атанасов

Членове:

акад. дтн Иван Попчев
проф. д-р Сотир Сотиров
доц. д-р Любка Дуковска
доц. д-р Олимпия Роева

Автор: инж. Ваня Красиминова Георгиева

Заглавие: Обобщеномрежово моделиране на процеси на пречистване на води

Увод

Векове наред хората не са познавали същността на водата. Преди около 600 г. пр.н.е. Талес от Милет направил глобалния извод, че водата е първоизточник на всичко съществуващо в света. Няколко столетия след него римляните оставят на човечеството израза „*Aqua omnia sunt*” (лат. „Водата съществува навсякъде”). Стоотици години водата от природните източници е оценявана въз основа на критерия, дали е годна за пиене, т.е. дали може да удовлетвори онази неотменна човешка потребност, която определя наличието на водата като абсолютно необходимо условие за съществуването на човека като биологичен феномен.

С навлизането на човечеството в ерата на индустриалното производство ролята на водата започва да става все по-разностранны. Освен за битови нужди, тя се превръща в обект на потребление като работна среда, топлоносител или работно тяло в редица производства. Растежът на промишленото производство и свързаните с него големи демографски изменения стават причина за постоянното увеличение на потреблението на вода от човечеството. При тези условия осигуряването на необходимите количества вода е все по-трудно, тъй като капацитетът на повечето водоизточници е ограничен. В редица важни технологични процеси природните води не могат да бъдат използвани без предварителна обработка (кондициониране). Същевременно в процеса на употребата в промишлеността водите обикновено се обогатяват с различни по характер и дисперсност примеси, в резултат на което се налага те да бъдат отведени от производствения процес и изпуснати в околната среда, т.е. получават се *отпадъчни води*.

В началото само отпадъчните води, съдържащи токсични замърсители, са се подлагали на пречистване преди изпускането им в околната среда. Това подценяване на опасността за замърсяване на природните водоеми от изпусканите в тях огромни маси отпадъчни води и други отпадъци от производството и бита се превръща в реална заплаха за екологична катастрофа на цели райони. Осъзнава се необходимостта от т.нар. *режим на комплексно използване на водите*, с което се създават реални предпоставки за намаляване на потреблението на природни води и за значително ограничаване на количествата на постъпващите в околната среда отпадъчни води.

Режимът на комплексно използване на водите, от своя страна, изисква правилно и качествено водене на процесите на обработване на водите за постигане на предварително зададените технологични или екологични изисквания към тях. Цели се оптимизиране на прилаганите технологии за пречистване на води, което е въпрос на икономическа целесъобразност и техническа възможност. Тази задача се решава от мениджмънта на всяка една компания на базата на добри търговски практики и при условия на оптимизация на оперативния контрол на производствените процеси.

За оптимизирането на технологиите за пречистване на води съществена и адекватна помощ може да окаже прилагането на апарата на

обобщените мрежи (ОМ). ОМ предоставят възможности за намиране на оптимални условия за протичането на процесите; проследяване на всички променливи, включени в обобщеномрежовите модели, както и за изучаване на процесите на базата на експериментални данни и за управление на базата на експертни системи. На базата на ОМ може да се постигне по-комплексно анализиране и проследяване на етапите на пречистване, по-точна настройка на някои технологични параметри, минимизиране на времената за изчакване, получаване на полезни предложения за оптимизиране на протичащите процеси, както и намаляване на разходите за пречистването.

Симулирането на разработените ОМ-модели с реални експериментални данни позволява да се направят оценки на състоянието, прогнози за критични моменти или ситуации, да се планира разпределението на ресурси, материалната база, апаратурата и др. Програмната реализация и симулацията на разработените ОМ-модели може да отговори на вече поставени въпроси или да доведе до формулирането на нови, както и да подпомага процесите на вземане на решения при планиране.

Въз основа на така откритите проблеми, към настоящия дисертационен труд се поставят следната цел и задачи:

Основна цел: приложение на теорията на обобщените мрежи за моделиране, симулиране и мониторинг на процеси в пречиствателни станции за кондициониране на природни води и за отпадъчни води.

За постигане на поставената цел се формулират следните **задачи**:

1. Разработване на обобщеномрежови (ОМ) модели на пречиствателни станции за води:
 - 1.1. ОМ-модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води.
 - 1.2. ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води.
2. Разработване на ОМ-модели на основни етапи от технологичната схема в пречиствателна станция за отпадъчни води:
 - 2.1. ОМ-модел на механично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води.
 - 2.2. ОМ-модел на физикохимично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води.
 - 2.3. ОМ-модел на биологично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води.
3. Симулиране на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води:
 - 3.1. Разработване на ОМ-модел в среда *Generalized Net Integrated Development Environment* (GN IDE).
 - 3.2. Симулиране на разработения ОМ-модел на базата на реални данни в среда GN IDE.

Глава 1

Обзор на методите за пречистване на води

В *Глава 1* е представена класификация на съществуващите видове природни и отпадъчни води, в зависимост от източниците на получаване и характера на замърсяване. Направен е преглед на основните методи, прилагани за пречистване на води, които се обуславят от многообразието на съдържащите се в тях примеси. На всяко фазоводисперсно състояние на примесите съответства определен метод или съвкупност от методи за въздействие, чрез които се постигат изискваните качествени показатели на водата, съгласно предназначението им или нормите за заустване.

Най-често използваните методи за пречистване на води могат да се класифицират в следните групи: *механични, физикохимични, химични и биологични*.

Механичното пречистване се прилага за отделяне на суспендираните или неразтворимите примеси. То се осъществява чрез *прецеждане през решетки и сита, усредняване, утаяване (свободно, несвободно и суспензионно), филтруване*.

Физикохимичното пречистване на водите включва процесите на: *коагулация, флотация, адсорбция, йонен обмен, мембранни методи (обратна осмоза, ултрафилтрация, електродиализа)* и др.

Химичното пречистване се осъществява чрез процесите на *химично утаяване, неутрализация, окисляване и редукция*.

Биологичното пречистване включва методите за пречистване при естествени условия – всякакъв вид съоръжения за почвено пречистване и биологични езера, аеробно окисляване в биофилтри, биобасейни и анаеробно разграждане в метантанкове. Биотехнологичните процеси при пречистване на отпадъчни води се базират на използването на различни микроорганизми. Представена е класификация на биотехнологичните процеси според предназначението на процеса на пречистване или доминиращия подпроцес.

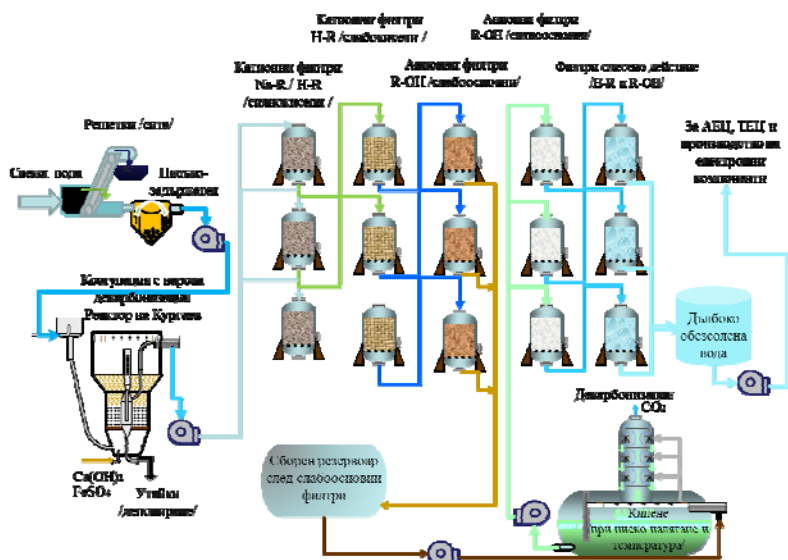
В тази глава са разгледани и някои нови насоки в развитието на методите на обработка на водите и приложението им в процесите на пречистване. Показани са новите тенденции на непрекъснато оптимизиране на процесите с вече познати материали, както и все по-широкото приложение на използването на природни екологични материали – например кокосови черупки, различни видове дървесина, оризови люспи и др. за производството на адсорбенти. В прегледа на литературата се показват изследванията на много учени към подобряване – както на отделните фактори на процесите, така и на самите съоръжения, в които протичат технологичните процеси. Освен ефекта на пречистване се търси решение и за извличане на ценните компоненти от третираните води с възможност и за по-нататъшното им използване.

Глава 2

Технологично описание на процесите на пречистване

В Глава 2 са описани основните технологични схеми на водоподготвителна инсталация за кондициониране на природни води и на пречиствателна станция за отпадъчни води. Комбинирането на разгледаните в Глава 1 методи за обработка на водите в единна технологична схема зависи от състава на конкретните води, както и от по-нататъшното им приложение – за използване за питейни цели, за работа на ТЕЦ или АЕЦ, за повторно използване в производството или заустване в съответен водоприемник и др. Акцентирано е върху някои особености на технологията на провеждането на пречиствателните процеси.

2.1. Технологична схема на водоподготвителна инсталация



Фиг. 1. Технологична схема на водоподготвителна инсталация

Представената технологична схема обхваща основните етапи на обработване на природните води преди използването им за различни цели. При водовземане от повърхностен сладководен водоизточник, като първа степен се извършва прецеждане през решетки и сита. Отделянето на преминалите след решетките води се подават за следваща обработка в пясъкозадържатели. Това съоръжение се използва само в случаи на наличие на механични примеси с определена хидравлична едрина (пясъци).

Следващият етап в технологичната схема включва физикохимични процеси на третиране на водите – коагулация, добавка на флокулант, химично утаяване – варова декарбонизация (понижаване на твърдостта на водата). Посочените процеси могат да се извършват в едно единствено съоръжение – т.нар. Реактор на Кургаев.

Преминала през физикохимичния етап, третираната вода постъпва за химическа обработка в йонообменни филтри. Представената схема на йонообменните филтри е най-обща, като според целите и състава на обработваната вода се определят вида и подредбата им. Схемите на подредба могат да бъдат линейни или пръстенни. Показаната технологична схема позволява чрез превключване да се премине от единия в другия вид, т.е. тя е смесена (или хибридна), и съответно да се получава различен тип вода – омекотена, частично обезсолена, обезсолена, дълбоко обезсолена.

Пълната технологична линейна схема за йонообменна обработка за получаване на *обезсолена вода* е следната:

H-R слабокисел катионитен филтър – H-R силнокисел катионитен филтър – R-OH слабоосновен анионитен филтър – Декарбонизатор – R-OH силноосновен анионитен филтър – Филтър смесено действие

2.2. Технологична схема за пречистване на отпадъчни води

Най-общо процесът на пречистване на отпадъчни води с включващите се в него пречиствателни процеси и апарати, може да бъде представен с технологичната схема от Фиг. 2.



Фиг. 2. Технологична схема на процесите на пречистване на отпадъчни води

На представената технологична схема пречистването на отпадъчните води преминава през три основни етапа – *механично, физикохимично и биологично пречистване*.

Механичното пречистване е задължително първо технологично стъпало за третиране на битови и промишлени отпадъчни води. При него трябва да се извърши отстраняване на пречещите груби частици, за да се предпазят следващите технологични стъпала от повреди или замърсявания и да се облекчи тяхната работа. Механичното пречистване рядко се използва като самостоятелен и краен метод. То се провежда преди *физикохимичното и биологичното* пречистване. Механичното пречистване включва няколко етапа.

При големите пречиствателни станции, по преценка, в началото на довеждащия канал могат да се предвидят защитни *решетки*.

Ситата, обикновено монтирани след *решетките*, се прилагат за пречистване на градски отпадъчни води и като технологично оборудване в цеховете на някои промишлени предприятия за задържане на ценни материали, които се използват повторно в производството.

След *решетките* и *ситата* отпадъчните води постъпват в *пясъкозадържатели*. Пясъкозадържателите се изграждат задължително, при количество на отпадъчните води над 100 м³/ден. Тук се утаяват от 55 до 95% от всички минерални частици, съдържащи се във водата.

След пясъкозадържателя при необходимост, в зависимост от качеството на водата, се поставя *маслоуловител* или *нефтоуловител*. В пречиствателните станции най-често преди утаителите се монтират т.нар. *уреднителни*.

Процесът *утаяване* се използва за намаляване мътността и твърдите неразтворени частици от минерален и органичен произход, съдържащи се в отпадъчните води. *Утаителите* от технологичната схема на Фиг. 2 са проектирани да намалят скоростта на потока вода и по този начин механичните примеси да се утаят на дъното на съоръженията под действие на гравитационните сили. В представената технологична схема на пречиствателната станция има два вида утаители – *първични* и *вторични*. Първичните утаители са основна част от съоръженията за механично пречистване и се използват преди основния пречиствателен процес. Те обикновено се монтират след нефтоуловителя, в началото на пречиствателната станция. Вторичните утаители (най-често радиални) също са задължителен елемент, който се монтира след съоръженията за биологично пречистване. Те служат за утаяване на вече коагулирани и минерализирани вещества.

В повечето случаи след преминаване на отпадъчните води през механичното стъпало на пречистване, те постъпват във *физикохимичното стъпало* на пречиствателната станция. Физикохимичното третиране се използва за пречистване както на битови, така и на промишлените отпадъчни води. За промишлените отпадъчни води е характерно високо съдържание на финодиспергирани механични и колоидни примеси, като наред с отстраняването им в процеса чрез съутаяване/коагулация се постига и значително снижение на органичното замърсяване.

След механичното и физикохимичното стъпало обработваните води постъпват за *биологично* пречистване. То представлява основен етап в пречистването на отпадъчните води, характеризиращ се с многообразие и сложност на протичащите в него процеси, както и с влияние и зависимости на голям комплекс от фактори. Много по-ефективни са процесите на пречистване, протичащи в многостъпалните пречиствателни станции (Фиг. 2), в които протичат *хетеротрофни асимилационни процеси*. При тези процеси се асимилират органичните замърсители, намиращи се във водите (т.нар. въглеродна асимилация). При това се получава нова клетъчна маса и крайни продукти на окислението – въглероден диоксид, вода и амониак. В процеса на пречистването се извършва *нитрификация* – амониакът, съдържащ се в отпадъчните води, се превръща в нитрити или нитрати. Необходимостта от намаляването на концентрацията на амониака се дължи на неговата токсичност спрямо живите организми и на значителната консумация на кислород при нитрификацията на амониак във водоприемника (т.нар. цъфтеж на водата).

Другият много важен процес при осъществяване на биологичното пречистване на отпадъчни води е процесът на *денитрификация*. При него кислородът, свързан в нитратите и нитритите, може да бъде използван при недостиг на молекулен кислород за дишане на хетеротрофните микроорганизми (*Nitrosomonas*, *Nitrobacter*). Освободеният азот под формата на газ, както и въглеродният диоксид, се отстраняват в деаератор.

Процесът на *дефосфатацията* се провежда съвместно с процесите на биологична *нитрификация* и *денитрификация*. При това рециркулиращата биомаса преминава последователно през анаеробната и аноксична зона, където фосфатите се освобождават от клетките във водата и след това тя преминава през аеробната зона, където излишният фосфат се консумира.

Пречистените отпадъчни води се разделят от активната утайка във *вторичния радиален утаител*. *Вторичните утаители* имат повече от една функция: разделят суспендираната биомаса от пречистените отпадъчни води; уплътняват суспендираната биомаса; съхраняват биомасата, транспортирана от биобасейните или биореакторите при динамично изменение (нарастване) на водното количество. От *вторичния утаител* част от активната утайка се връща обратно в биобасейна (когато биобасейнът е съоръжението за биологично пречистване), а излишната активна утайка бива извеждана за понататъшна обработка и депониране. Избистрените отпадъчни води се извеждат от горната част на *вторичния утаител* и се подават за *механично филтруване* или *флотация* до пълното отстраняване на останала активна утайка, след което постъпва за хлориране или озониране.

След преминаването на последния етап от пречиствателния процес, пречистените отпадъчни води се заустват или биват подавани за повторно използване в производствения процес.

Глава 3

Въведение в обобщените мрежи

В Глава 3 са дадени кратки бележки за теоретичните основи на апарата на ОМ.

Представени са дефиниции на понятията преход и обобщена мрежа. Разгледани са последните версии на базовия алгоритъм за функциониране на преход и мрежа, както и методологията за изграждане на ОМ. Направен е кратък преглед на различните модификации на ОМ. Специално внимание е обърнато на развитието на програмните продукти за симулиране на ОМ-модели.

Направеният обзор показва широкото приложение на ОМ в различни области като изкуствен интелект, приложна математика, наукометрия, невронни мрежи, експертни системи, икономика, индустрия, транспорт, компютърни науки, медицина, биология, работа с бази знания и бази данни, описание на информационни потоци в университетите и много други.

До този момент апаратът на ОМ е бил прилаган и за разработване на модели за пречистване на отпадъчни води, в това число на процес на метанова ферментация, както и на пречиствателни процеси, протичащи в биофилтър и в система „биобасейн – утаител“. Моделирането на процеса на пречистване на отпадъчни води, използвайки ОМ, дава възможност освен за описание на паралелни във времето процеси, каквито са процесите в системата „биобасейн – утаител“, и за използване на различни времеви скали за активирането на преходите на ОМ. Приложението на ОМ предоставя възможности за намиране на оптималните условия за процеса на пречистване на отпадъчни води и управление в реално време, което не може да бъде реализирано с често използвания модел, базиран на диференциални уравнения. Теорията на ОМ също позволява и проследяването на всички променливи на процеса, включени в ОМ. Според стойностите на някои променливи, като концентрацията на активната утайка, концентрацията на органичното замърсяване и други индекси, които отразяват степента на пречистване на отпадъчните води, могат да бъдат взети някои технологични решения, като например удължаването или редуцирането на продължителността на престоя в биобасейна или в утаителя.

Глава 4

Обобщеномрежови модели на пречиствателни станции за природни и отпадъчни води

В Глава 4 са представени новоразработените ОМ-модели на водоподготвителна инсталация за кондициониране на природни води и на пречиствателна станция за промишлени отпадъчни води.

4.1. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води

Технологичната схема, описваща етапите на кондициониране на природни води, беше представена в детайли на Фиг. 1 в Глава 2. Както бе споменато, процесът на кондициониране се налага от необходимостта природните води, които се използват като охлаждащ агент, топлоносител или работно тяло/среда в съвременната промишленост да отговарят на определени изисквания за осигуряване на безаварийна и ефективна работа на съоръженията. Например те не трябва да предизвикват корозия, накипи, механични и биологични отложения върху технологичните системи. Първата стъпка е извършването на скрининг на водата през решетки (груби или фини). Автоматичният технологичен контрол се осъществява чрез наблюдение на разликата в нивата на водите преди и след решетките (ситата). Следват процеси на варова декарбонизация (съвместно с коагулация и флокулация). Контролът на обработваните води се извършва на изхода на съоръжението (най-често реактор тип „Кургаев“) по показателите: обща твърдост (лабораторен анализ), рН (измерване в реално време), калциеви йони като състав от общата твърдост, колматация (лабораторен анализ или измерване в реално време) – нифелометрично определяне на мътността.

Следващ етап е химическата обработка на водите, която се извършва в йонообменни филтри – катионитни и анионитни. Подреждането на филтрите се определя от целта какви йони се цели да бъдат премахнати от водите и от състава на водите. Една примерна технологична схема може да изглежда така:

Na-R силнокисел катионитен филтър – H-R катионитни филтри (слабокисел и силнокисел) – R-OH слабоосновен анионитен филтър – декарбонизатор –

R-OH силноосновен анионитен филтър – филтър смесено действие

Контролът, който се провежда след всеки филтър, позволява да се направи оценка на ефективността на работа, степента на изчерпване на филтъра, точният момент за начало на започване на регенерацията му, регенерация и обратното връщане на филтъра в работни условия. Контролът върху цялостната ефективност на оборудването е насочен основно към рН, концентрация на Na йони и електропроводимостта в непрекъснат режим в реално време.

ОМ-моделът на процесите, протичащи в пречиствателната станция за кондициониране на природни води е представен на Фиг. 4. ОМ се представя със следното множество A :

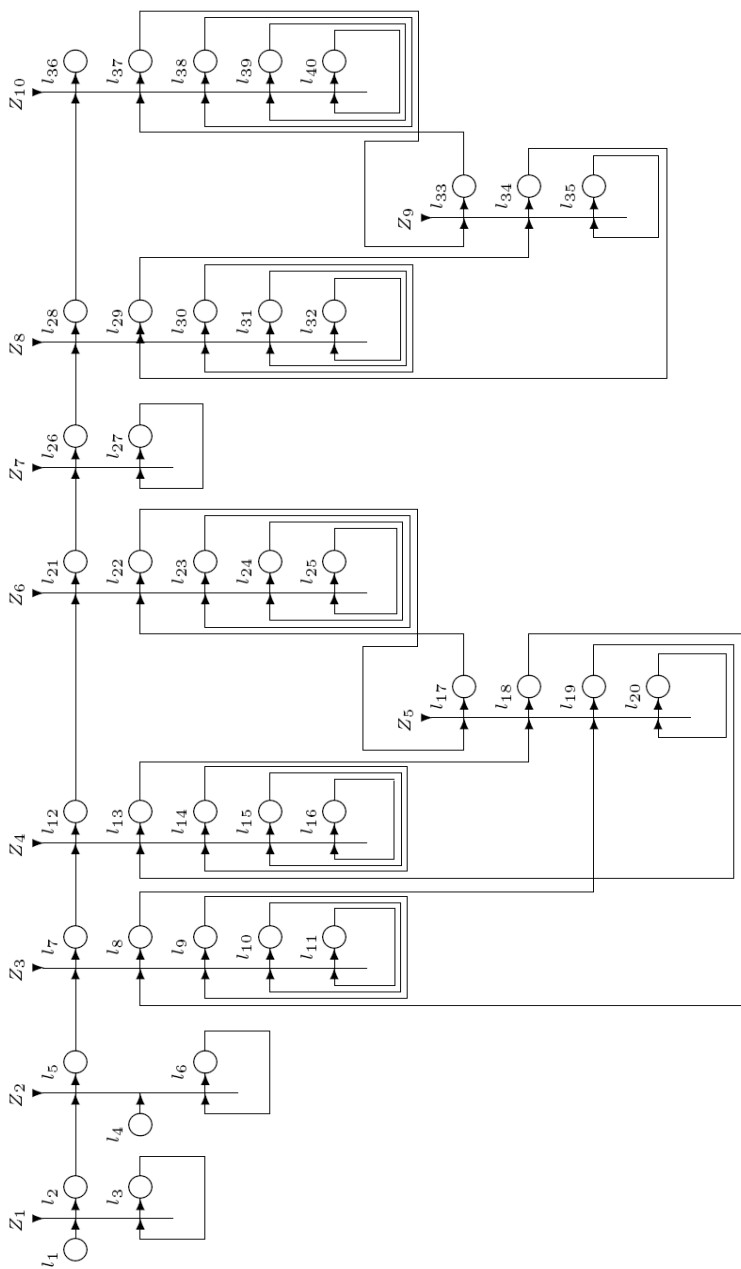
$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}\},$$

където преходите описват:

- Процесите на механично пречистване:
 - o Функциите на пясъкозадържателя – преход Z_1 ;
- Процесите на физикохимично пречистване:
 - o Функциите на реактор тип „Кургаев” – преход Z_2 ;
 - o Функциите на Na-R филтри – преход Z_3 ;
 - o Функциите на H-R филтри – преход Z_4 ;
 - o Функциите на възела за регенерация на Na-R, H-R и R-OH слабоосновни филтри – преход Z_5 ;
 - o Функциите на R-OH слабоосновни филтри – преход Z_6 ;
 - o Функциите на декарбонизатора – преход Z_7 ;
 - o Функциите на R-OH силноосновни филтри – преход Z_8 ;
 - o Функциите на възела за регенерация на R-OH силноосновни филтри и филтри смесено действие – преход Z_9 ;
 - o Функциите на филтри смесено действие – преход Z_{10} .

Първоначално ядрата ε , β , $\Phi_{1,1}$, $\Phi_{1,2}$, $\Phi_{1,3}$, $\Phi_{2,1}$, $\Phi_{2,2}$, $\Phi_{2,3}$, γ , $\Phi_{3,1}$, $\Phi_{3,2}$, $\Phi_{3,3}$, φ , $\Phi_{4,1}$, $\Phi_{4,2}$, $\Phi_{4,3}$, δ , $\Phi_{5,1}$, $\Phi_{5,2}$, $\Phi_{5,3}$ стоят в позиции I_3 , I_6 , I_9 , I_{10} , I_{11} , I_{14} , I_{15} , I_{16} , I_{20} , I_{23} , I_{24} , I_{25} , I_{27} , I_{30} , I_{31} , I_{32} , I_{35} , I_{38} , I_{39} , I_{40} . Те ще стоят в тези позиции през цялото време на функциониране на ОМ, като могат да генерират нови ядра. Оригиналните ядра имат следните начални и текущи характеристики:

- ε -ядро в позиция I_3 – „Пясъкозадържател”;
- β -ядро в позиция I_6 – „Реактор тип Кургаев”;
- $\Phi_{1,1}$, $\Phi_{1,2}$, $\Phi_{1,3}$ -ядра в позиции I_9 , I_{10} и I_{11} – „Na-R филтри, параметри”;
- $\Phi_{2,1}$, $\Phi_{2,2}$, $\Phi_{2,3}$ -ядра в позиции I_{14} , I_{15} и I_{16} – „H-R филтри, параметри”;
- γ -ядро в позиция I_{20} – „Възел за регенерация на Na-R, H-R и R-OH слабоосновни филтри”;
- $\Phi_{3,1}$, $\Phi_{3,2}$, $\Phi_{3,3}$ -ядра в позиции I_{23} , I_{24} и I_{25} – „R-OH слабоосновни филтри, параметри”;
- φ -ядро в позиция I_{27} – „Декарбонизатор”;
- $\Phi_{4,1}$, $\Phi_{4,2}$, $\Phi_{4,3}$ -ядра в позиции I_{30} , I_{31} и I_{32} – „R-OH силноосновни филтри, параметри”;
- δ -ядро в позиция I_{35} – „Възел за регенерация на R-OH силноосновни филтри и филтри смесено действие”;
- $\Phi_{5,1}$, $\Phi_{5,2}$, $\Phi_{5,3}$ -ядра в позиции I_{38} , I_{39} и I_{40} – „Филтри смесено действие, параметри”.



Фиг. 4. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води

Ядрото α постъпва в ОМ-модела през позиция l_1 с първоначална характеристика „Природни води, количество”.

Първият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_1 = \langle \{l_1, l_3\}, \{l_2, l_3\}, r_1, \wedge(l_1, l_3) \rangle,$$

$r_1 =$	l_2	l_3
l_1	true	false
l_3	false	true

Ядрото α в позиция l_2 получава характеристика „Природни води, пречистени през пясъчен филтър, количество” и „Пясъчен филтър, параметри” в позиция l_3 .

Новото ядро β , постъпващо в ОМ през позиция l_4 е с начална характеристика „Калциева основа, ново количество”.

Вторият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_2 = \langle \{l_2, l_4, l_6\}, \{l_5, l_6\}, r_2, \wedge(l_2, \vee(l_4, l_6)) \rangle,$$

$r_2 =$	l_5	l_6
l_2	true	false
l_4	false	true
l_6	false	true

Ядрото α в позиция l_5 получава характеристики „Вода след варова декарбонизация, количество” и „Калциева основа, текущо количество” в позиция l_6 .

Ядрата $\Phi_{1,1}$, $\Phi_{1,2}$ и $\Phi_{1,3}$, стоящи в позиции l_9 , l_{10} , и l_{11} , са съответно с начална характеристика „Na-R филтри, параметри”.

Третият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_3 = \langle \{l_5, l_9, l_{10}, l_{11}, l_{18}\}, \{l_7, l_8, l_9, l_{10}, l_{11}\}, r_3, \wedge(l_5, \vee(l_9, l_{10}, l_{11}, l_{18})) \rangle,$$

$r_3 =$	l_7	l_8	l_9	l_{10}	l_{11}
l_5	false	false	$W_{5,9}$	$W_{5,10}$	$W_{5,11}$
l_9	true	$W_{9,8}$	$W_{9,9}$	false	false
l_{10}	true	$W_{10,8}$	false	$W_{10,10}$	false
l_{11}	true	$W_{11,8}$	false	false	$W_{11,11}$
l_{18}	false	false	$W_{18,9}$	$W_{18,10}$	$W_{18,11}$

където:

$W_{5,9} = W_{5,10} = W_{5,11} =$ „В текущата позиция има Φ -ядро”;

$W_{9,8} = W_{10,8} = W_{11,8} =$ „Филтърът е замърсен”;

$W_{9,9} = W_{10,10} = W_{11,11} = \neg W_{9,8}$;

$W_{18,9} = W_{18,10} = W_{18,11} =$ „Филтърът е регенериран и готов за работа”.

Ядрото α получава следната характеристика „Избистрена вода след Na-R филтри” в позиция l_7 . До достигане на пределната степен на замърсяване на всеки филтър, Φ -ядрото постъпва в позиции l_8 , l_{13} , l_{22} , l_{29} , l_{37} , без нова характеристика, т.е. запазват се характеристиките както следва: за позиция l_8 – „Регенерирани Na-R филтри”, за позиция l_{13} – „Регенерирани H-R филтри”, за позиция l_{22} – „Регенерирани R-ОН слабоосновни филтри”, за позиция l_{29} – „Регенерирани R-ОН силноосновни филтри”, за позиция l_{37} – „Регенерирани филтри смесено действие”. Ядрата $\Phi_{2,1}$, $\Phi_{2,2}$ и $\Phi_{2,3}$, стоящи в позиции l_{14} , l_{15} , и l_{16} са съответно с начална характеристика „H-R филтри, параметри (степен на замърсяване)”.

Четвъртият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_4 = \langle \{l_7, l_{14}, l_{15}, l_{16}, l_{19}\}, \{l_{12}, l_{13}, l_{14}, l_{15}, l_{16}\}, r_4, \wedge(l_7, \vee(l_{14}, l_{15}, l_{16}, l_{19})),$$

$r_4 =$	l_{12}	l_{13}	l_{14}	l_{15}	l_{16}
l_7	false	false	$W_{7,14}$	$W_{7,15}$	$W_{7,16}$
l_{14}	true	$W_{14,13}$	$W_{14,14}$	false	false
l_{15}	true	$W_{15,13}$	false	$W_{15,15}$	false
l_{16}	true	$W_{16,13}$	false	false	$W_{16,16}$
l_{19}	false	false	$W_{19,14}$	$W_{19,15}$	$W_{19,16}$

където:

$W_{7,14} = W_{7,15} = W_{7,16} =$ „В текущата позиция има Φ -ядро”;

$W_{14,13} = W_{15,13} = W_{16,13} =$ „Филтърът е замърсен”;

$W_{14,14} = W_{15,15} = W_{16,16} = \neg W_{14,13}$;

$W_{19,14} = W_{19,15} = W_{19,16} =$ „Филтърът е регенериран и готов за работа”.

Ядрото α получава характеристика „Избистрена вода след R-H филтри” в позиция l_{12} .

Петият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_5 = \langle \{l_8, l_{13}, l_{20}, l_{22}\}, \{l_{17}, l_{18}, l_{19}, l_{20}\}, r_5, \wedge(l_{20}, \vee(l_8, l_{13}, l_{22}))),$$

$r_5 =$	l_{17}	l_{18}	l_{19}	l_{20}
l_8	false	false	false	true
l_{13}	false	false	false	true
l_{20}	false	false	false	true
l_{22}	$W_{22,17}$	$W_{22,18}$	$W_{22,19}$	false

където $W_{22,17} = W_{22,18} = W_{22,19} =$ „Има филтри за регенерация”.

В позиция l_{20} има ядро с характеристика „Възел за регенерация на Na-R, H-R и R-OH слабоосновни филтри”.

В позиции l_{17}, l_{18}, l_{19} ядрата запазват характеристиките си съответно „Регенерация на R-OH слабоосновни филтри” за l_{17} , „Регенерация на H-R филтри” за l_{18} и „Регенерация на Na-R филтри” за l_{19} .

Ядрата $\Phi_{3,1}, \Phi_{3,2}, \Phi_{3,3}$, стоящи в позиции l_{23}, l_{24}, l_{25} , са съответно с начална характеристика „R-OH слабоосновни филтри, параметри”.

Шестият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_6 = \langle \{l_{12}, l_{17}, l_{23}, l_{24}, l_{25}\}, \{l_{21}, l_{22}, l_{23}, l_{24}, l_{25}\}, r_6, \wedge(l_{12}, \vee(l_{17}, l_{23}, l_{24}, l_{25})),$$

$r_6 =$	l_{21}	l_{22}	l_{23}	l_{24}	l_{25}
l_{12}	false	false	$W_{12,23}$	$W_{12,24}$	$W_{12,25}$
l_{17}	false	false	$W_{17,23}$	$W_{17,24}$	$W_{17,25}$
l_{23}	true	$W_{23,22}$	false	$W_{23,24}$	false
l_{24}	true	$W_{24,22}$	false	false	$W_{24,25}$
l_{25}	true	$W_{25,22}$	$W_{25,23}$	false	false

където:

$W_{12,23} = W_{12,24} = W_{12,25} =$ „В текущата позиция има Φ -ядро”;

$W_{23,22} = W_{24,22} = W_{25,22} =$ „Филтърът е замърсен”;

$W_{25,23} = W_{23,24} = W_{24,25} = \neg W_{23,22}$;

$W_{17,23} = W_{17,24} = W_{17,25} =$ „Филтърът е регенериран и готов за работа”.

Ядрото α получава следваща характеристика „Избистрена вода след R-OH слабоосновни филтри” в позиция l_{21} .

Седмият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_7 = \langle \{l_{21}, l_{27}\}, \{l_{26}, l_{27}\}, r_7, \vee(l_{21}, l_{27})),$$

$$r_7 = \begin{array}{c|cc} & l_{26} & l_{27} \\ l_{21} & false & true \\ l_{27} & W_{27,26} & W_{27,27} \end{array}$$

където:

$W_{27,26}$ = „Декарбонизаторът е в текуща позиция“;

$W_{27,27}$ = „CO₂ е отстранен от декарбонизатора“.

Ядрото α получава характеристики „Избистрена вода след декарбонизация“ и „CO₂“ съответно в позиции l_{26} и l_{27} .

Ядрата $\Phi_{4,1}$, $\Phi_{4,2}$, $\Phi_{4,3}$, стоящи в позиции l_{30} , l_{31} , l_{32} , съответно са с начална характеристика „R-OH силноосновни филтри, параметри“.

Осмият преход на OM-модела има вида:

$$Z_8 = \langle \{l_{26}, l_{30}, l_{31}, l_{32}, l_{34}\}, \{l_{28}, l_{29}, l_{30}, l_{31}, l_{32}\}, r_8, \wedge (l_{26}, \vee (l_{30}, l_{31}, l_{32}, l_{34})) \rangle,$$

$$r_8 = \begin{array}{c|ccccc} & l_{28} & l_{29} & l_{30} & l_{31} & l_{32} \\ l_{26} & false & false & W_{26,30} & W_{26,31} & W_{26,32} \\ l_{30} & true & W_{30,29} & W_{30,30} & false & false \\ l_{31} & true & W_{31,29} & false & W_{31,31} & false \\ l_{32} & true & W_{32,29} & false & false & W_{32,32} \\ l_{34} & false & false & W_{34,30} & W_{34,31} & W_{34,32} \end{array}$$

където:

$W_{26,30} = W_{26,31} = W_{26,32}$ = „В текущата позиция има Φ -ядро“;

$W_{30,29} = W_{31,29} = W_{32,29}$ = „Филтърът е замърсен“;

$W_{30,30} = W_{31,31} = W_{32,32} = \neg W_{30,29}$;

$W_{34,30} = W_{34,31} = W_{34,32}$ = „Филтърът е регенериран и готов за работа“.

В позиция l_{28} ядрото α получава характеристика „Избистрена вода след R-OH силноосновни филтри“.

Ядрата $\Phi_{5,1}$, $\Phi_{5,2}$, $\Phi_{5,3}$, стоящи в позиции l_{38} , l_{39} , l_{40} , са съответно с начална характеристика „Филтри смесено действие, параметри“.

Деветият преход на OM-модела има вида:

$$Z_9 = \langle \{l_{29}, l_{35}, l_{37}\}, \{l_{33}, l_{34}, l_{35}\}, r_9, \wedge (l_{35}, \vee (l_{29}, l_{37})) \rangle,$$

$$r_9 = \begin{array}{c|ccc} & l_{33} & l_{34} & l_{35} \\ l_{29} & false & false & true \\ l_{35} & false & false & true \\ l_{37} & W_{37,33} & W_{37,34} & W_{37,35} \end{array}$$

където $W_{37,33} = W_{37,34} = W_{37,35}$ = „Има филтри за регенерация“.

В позиция l_{35} има ядро с характеристика „Възел за регенерация на R-OH силноосновни филтри и филтри смесено действие“. В позиции l_{33} и l_{34} ядрата запазват характеристиките си съответно „Регенерация на филтри смесено действие“ за l_{33} и „Регенерация на R-OH силноосновни филтри“ за l_{34} .

Десетият преход на ОМ-модела има вида:

$$Z_{10} = \langle \{l_{28}, l_{33}, l_{38}, l_{39}, l_{40}\}, \{l_{36}, l_{37}, l_{38}, l_{39}, l_{40}\}, r_{10}, \wedge(l_{28}, \vee(l_{33}, l_{38}, l_{39}, l_{40})) \rangle,$$

$r_{10} =$	l_{36}	l_{37}	l_{38}	l_{39}	l_{40}
l_{28}	false	false	$W_{28,38}$	$W_{28,39}$	$W_{28,40}$
l_{33}	false	false	$W_{33,38}$	$W_{33,39}$	$W_{33,40}$
l_{38}	true	$W_{38,37}$	false	$W_{38,39}$	false
l_{39}	true	$W_{39,37}$	false	false	$W_{39,40}$
l_{40}	true	$W_{40,37}$	$W_{40,38}$	false	false

където:

$W_{28,38} = W_{28,39} = W_{28,40}$ = „В текущата позиция има Φ -ядро“;

$W_{38,37} = W_{39,37} = W_{40,37}$ = „Филтърът е замърсен“;

$W_{40,38} = W_{38,39} = W_{39,40} = \neg W_{38,37}$;

$W_{33,38} = W_{33,39} = W_{33,40}$ = „Филтърът е регенериран и готов за работа“.

Ядрото α получава в позиция l_{36} характеристика „Вода, пречистена за специални производствени цели“.

4.2. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за отпадъчни води

Съгласно представената в Глава 2 Фиг. 2 на технологична схема на процесите на пречистване на отпадъчни води, се преминава през 3 етапа: *механична, физикохимична и биологична* обработка на водите. Представеният тук ОМ-модел описва тези три етапа, а именно:

- *Механичната обработка* чрез процесите на прецеждане през решетки или сита, утаяване в пясъкозадържатели, отстраняване на нефтопродукти чрез нефтоуловител и утаяване в първичен утаител;
- *Физикохимично пречистване* чрез напорна флотация;
- *Биологично пречистване* (биобасейн с въглеродна асимилация). Биологично обработената вода постъпва във вторичен утаител, където активната биомаса се разделя от пречистените отпадъчни води чрез гравитационно утаяване. Основната част от уплътнената биомаса рециркулира към биобасейна, а останалата се отделя като излишна. Потокът от обработвана вода попада във филтър за механично филтруване и оттам може да бъде подаден в хлоратор или озонатор.

ОМ-моделът на процесите, протичащи в пречиствателна станция за отпадъчни води, е представен на Фиг. 5.

ОМ-моделът съдържа следното множество от преходи:

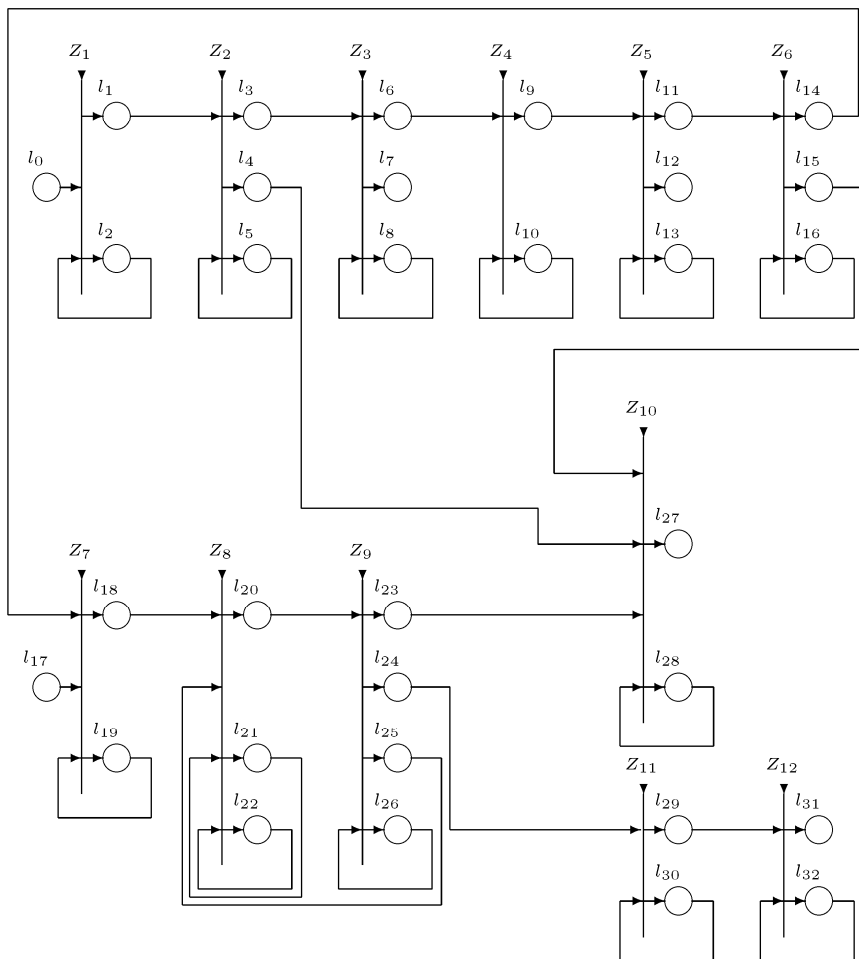
$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}\},$$

където преходите описват:

- Процеси на механичното пречистване:
 - o Получаването на замърсените отпадъчни води – преход Z_1 ;
 - o Прецеждането на отпадъчните води през решетки (сита) за отстраняване на едри примеси – преход Z_2 ;
 - o Функциите на пясъкозадържателя – преход Z_3 ;
 - o Функциите на шнековата помпа – преход Z_4 ;
 - o Функциите на масло (нефто) уловителя – преход Z_5 ;

- o Функциите на първичния утайтел – преход Z_6 ;
- Процеси на физикохимично пречистване – преход Z_7 ;
- Процеси на биологично пречистване:
 - o Функциите на биобасейна с въглеродна асимилация – преход Z_8 ;
 - o Функциите на вторичния утайтел – преход Z_9 ;
 - o Събирането на утайките – преход Z_{10} ;
 - o Механичното филтруване на водата – преход Z_{11} ;
 - o Хлорирането на водата – преход Z_{12} .

Пълното описание на мрежата е представено в [2].



Фиг. 5. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за отпадъчни води

4.3. Изводи

В настоящата глава от дисертационния труд за първи път са разработени ОМ-модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води и на пречиствателна станция за отпадъчни води.

Създаденият ОМ-модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води позволява провеждането на непрекъснат контрол над работата на съоръженията за кондициониране на природни води, като осигурява възможност за бърза оценка на ефективността им. Чрез ОМ-модела може да се извърши и по-точна настройка на някои от технологичните параметри на съоръженията, като например минимизиране на времената на изчакване при вземането на решения за поддържането на възможно най-добър технологичен режим на пречистване. Това от своя страна би могло да доведе до снижение на разходите за управление и пречистване на природни води.

Конструираният ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води позволява да се анализират в дълбочина процесите на пречистване на водите. Моделът осигурява по-комплексна оценка и проследяване стойностите на различните параметри, свързани със замърсяването на отпадъчните води. Той спомага за подобряване на възможността за оптимизиране на работата на включените в технологичната схема апарати и съоръжения, което от своя страна би могло да доведе и до оптимизацията на технологичния процес на пречистване на отпадъчни води и снижение на разходите за реализиране на процесите.

Представените в тази глава резултати са публикувани съответно в:

- ОМ-модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води:
 1. **Georgieva V.**, Generalized Net Model of the Process of Fresh Water Treatment, *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, 2013, Vol. 10, 163-172.
- ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води:
 2. **Георгиева В.**, Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция на води, *Годишник на Секция "Информатика", Съюз на учените в България*, 2013, Том 6, 68-75.

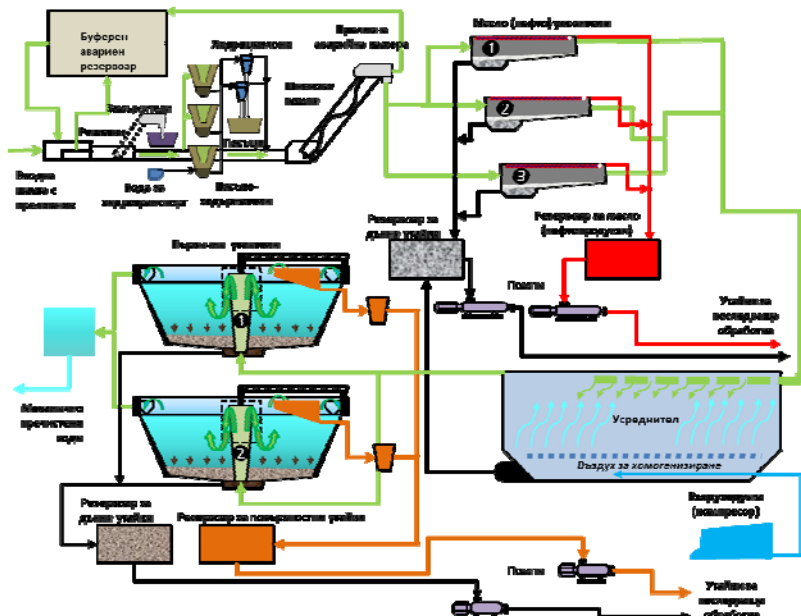
Глава 5

Обобщеномрежови модели на отделни стъпала в технологичната схема на пречиствателна станция за отпадъчни води

В Глава 5 са представени новоразработените ОМ-модели на отделни стъпала в технологичната схема на пречиствателна станция за отпадъчни води – механично, физикохимично и биологично стъпало.

5.1. Обобщеномрежов модел на механично стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води

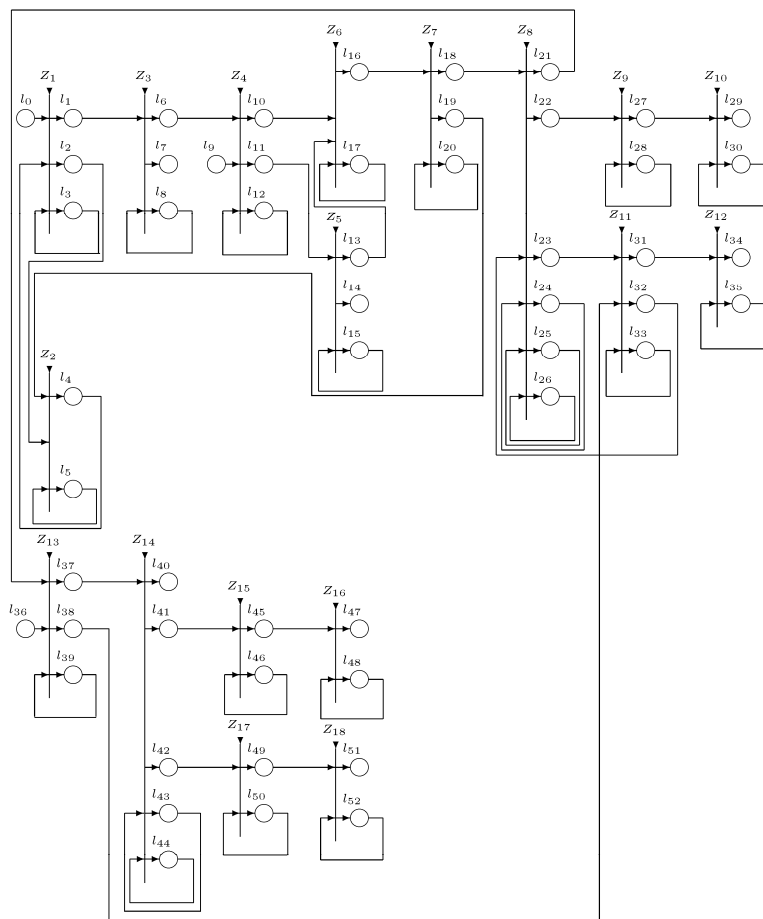
Стандартно, механичното пречистване се явява предварително пречистване. Основното му предназначение е отстраняване на по-едриите примеси, съдържащи се във водите, както и подготовката им за следващите етапи на обработка.



Фиг. 6. Технологична схема на механично стъпало
в пречиствателна станция за отпадъчни води

Механичното пречистване рядко се използва като самостоятелен и краен метод. Това може да се извърши само в случаите, когато след това

водата може да бъде използвана в технологичния процес или да бъде заустена във водоем, без да създава опасност от нарушаване на неговото екологично равновесие. Във всички други случаи механичното пречистване се явява първото стъпало от процеса на пречистване на отпадъчните води. Механичното пречистване, както беше подробно описано в *Глава 1*, т. 1.3.1, включва процеси на прецеждане през решетки и сита, усредняване, утаяване и филтруване. Технологичното описание на процеса, както и съоръженията, в които протича той, са разгледани най-общо в *Глава 2*, т. 2.2. Подробна технологична схема на процеса на механично третиране на отпадъчните води е представена на Фиг. 6. Следвайки я, е разработен ОМ-модел на процесите, протичащи в механичното стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води, представен на Фиг. 7.



Фиг. 7. ОМ-модел на механично стъпало
в пречиствателна станция за отпадъчни води

ОМ съдържа 18 прехода и 52 позиции, представени със следното множество A:

$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9, Z_{10}, Z_{11}, Z_{12}, Z_{13}, Z_{14}, Z_{15}, Z_{16}, Z_{17}, Z_{18}\},$$

където преходите описват съответно:

- Получаването на замърсени отпадъчни води – преход Z_1 ;
- Функциите на буферен аварийен резервоар – преход Z_2 ;
- Функциите на решетките – преход Z_3 ;
- Функциите на пясъкозадържателя – преход Z_4 ;
- Функциите на хидроциклоните – преход Z_5 ;
- Функциите на шнековите помпи – преход Z_6 ;
- Функциите на преливната аварийна камера – преход Z_7 ;
- Функциите на нефтоуловителите – преход Z_8 ;
- Функциите на резервоара за масла, нефт, нефтопродукти от нефтоуловителите – преход Z_9 ;
- Функциите на помпите за масла, нефт, нефтопродукти от нефтоуловителите – преход Z_{10} ;
- Функциите на резервоара за дънни утайки от нефтоуловителите – преход Z_{11} ;
- Функциите на помпите за дънни утайки от нефтоуловителите – преход Z_{12} ;
- Функциите на усреднителя – преход Z_{13} ;
- Функциите на първичните утаители – преход Z_{14} ;
- Функциите на резервоара за повърхностни утайки от първичните утаители – преход Z_{15} ;
- Функциите на помпите за повърхностни утайки от първичните утаители – преход Z_{16} ;
- Функциите на резервоара за дънни утайки от първичните утаители – преход Z_{17} ;
- Функциите на помпите за дънни утайки от първичните утаители – преход Z_{18} .

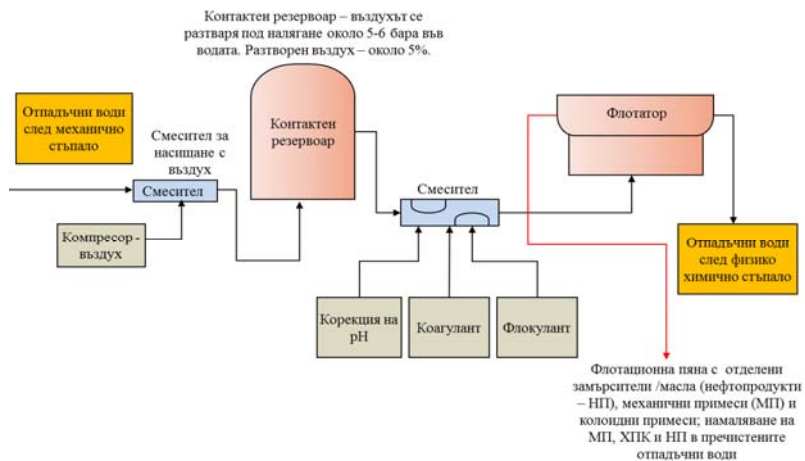
Пълното описание на мрежата е представено в [6].

5.2. Обобщеномрежов модел на физикохимично стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води

Физикохимичното третиране се използва за пречистване на битови отпадъчни води, на голяма част от промишлените отпадъчни води, както и получаване на руднични концентрати (във флотационни фабрики). За промишлените отпадъчни води е характерно високо съдържание на финодиспергирани механични и колоидни примеси, като наред с отстраняването им в процеса чрез съутаяване/коагулация се постига и значително снижение на органичното замърсяване (ХПК, БПК, масла, нефтопродукти). Като процес, физикохимичното пречистване се използва като крайно стъпало за предварително пречистване на отпадъчните води за постигане на нормите за биологично им очистване или като финално

(последващо) допречистване на биологично пречистени отпадъчни води. Включването му като процес преди или след биологичното стъпало зависи от състава на пречистващите води, както и от показателите, чието постигане се цели. Физикохимичното пречистване е и основното стъпало в пречиствателните станции, което може напълно да бъде автоматизирано.

Фиг. 8 представя технологична схема на процеса на физикохимично третиране на отпадъчните води.



Фиг. 8. Технологична схема на физикохимично стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води

Отстраняването на финодиспергираните (колоидни) примеси се извършва при дестабилизация на колоидната система чрез добавяне на коагулант. Следва дозиране на омрежващ полиелектролит (флокулант), внасянето на разтворен въздух в системата на отпадъчната вода и последващото ѝ подаване във флотатора. Образуваните флокули се извеждат от системата под формата на флотационна пена. За оптималното протичане на тези процеси е необходимо извършване в системата на строг рН-контрол. Основните показатели, които се проследяват на входа и изхода на физикохимичното стъпалото са: рН, механични примеси (неразтворени вещества), ХПК и други специфични замърсители (например масла, нефтепродукти, тежки метали).

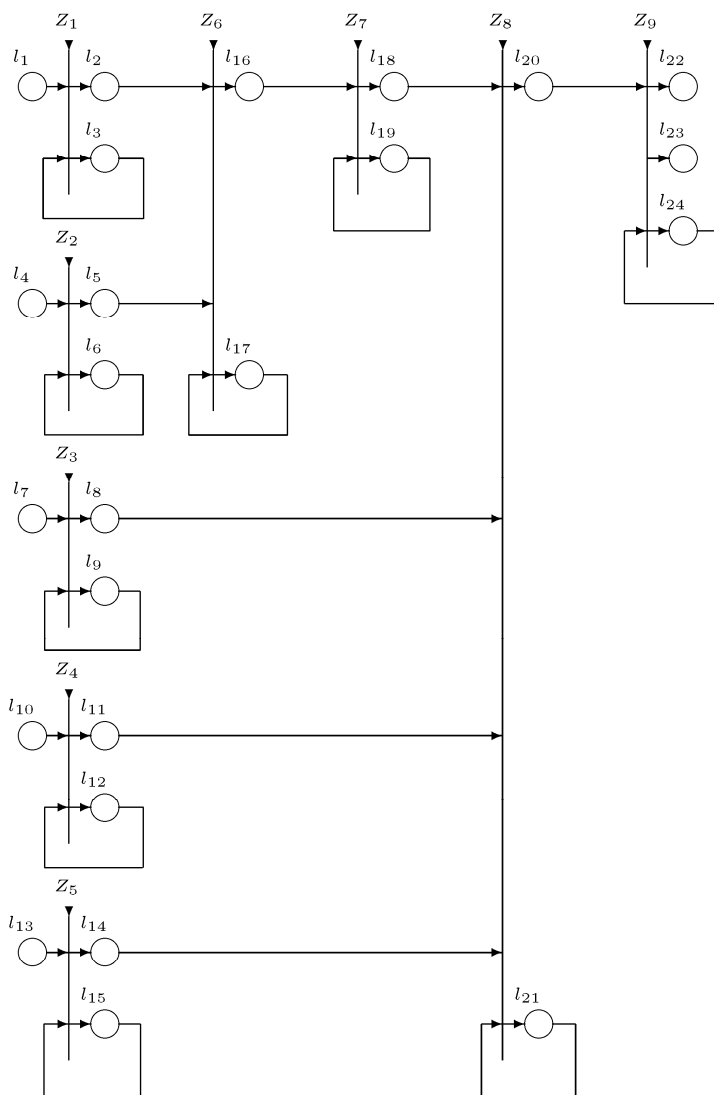
На Фиг. 9 е представен ОМ-модел на физикохимичното стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води.

ОМ-моделът съдържа следното множество от преходи

$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8, Z_9\},$$

където преходите описват съответно:

– Получаване на механично пречистени отпадъчни води (промишлени или битови) – преход Z_1 ;



Фиг. 9. ОМ-модел на физикохимично стъпало
в пречиствателна станция за отпадъчни води

- Функциите на компресора за въздух – преход Z_2 ;
- Корекция на рН – преход Z_3 ;
- Функциите на звеното за добавка на коагулант – преход Z_4 ;
- Функциите на звеното за добавка на флокулант – преход Z_5 ;

Технологичната схема на Фиг. 10 описва процесите на въглеродна асимилация, при които се разграждат органичните замърсители, намиращи се във водите. Като крайни продукти на окислението се получават въглероден диоксид, вода и амоняк. Отстраняването на амоняка се извършва чрез процес на нитрификация, при което той се превръща в нитрити или нитрати. Следва процес на денитрификация, при който кислородът, свързан в нитритите или нитратите, може да бъде използван при недостиг на молекулен кислород за дишане на хетеротрофните микроорганизми. Освободеният азот под формата на газ, както и въглеродният диоксид, се отстраняват в деаератор. Пречистените отпадъчни води се разделят от активната утайка в т.нар. вторичен радиален утайтел. Основните показатели, които се проследяват преди водите да бъдат заустени, са ХПК, БПК, механични примеси, фосфати и общ фосфор ($P-PO_4$), общ азот, нитратен, нитритен, амониен и др. ($N-NH_4$), специфични замърсители (например тежки метали), pH ($H+H_2SO_4$, $OH-NaOH$).

ОМ-моделът на процесите, протичащи в биологичното стъпало в пречиствателна станция, е представен на Фиг. 11.

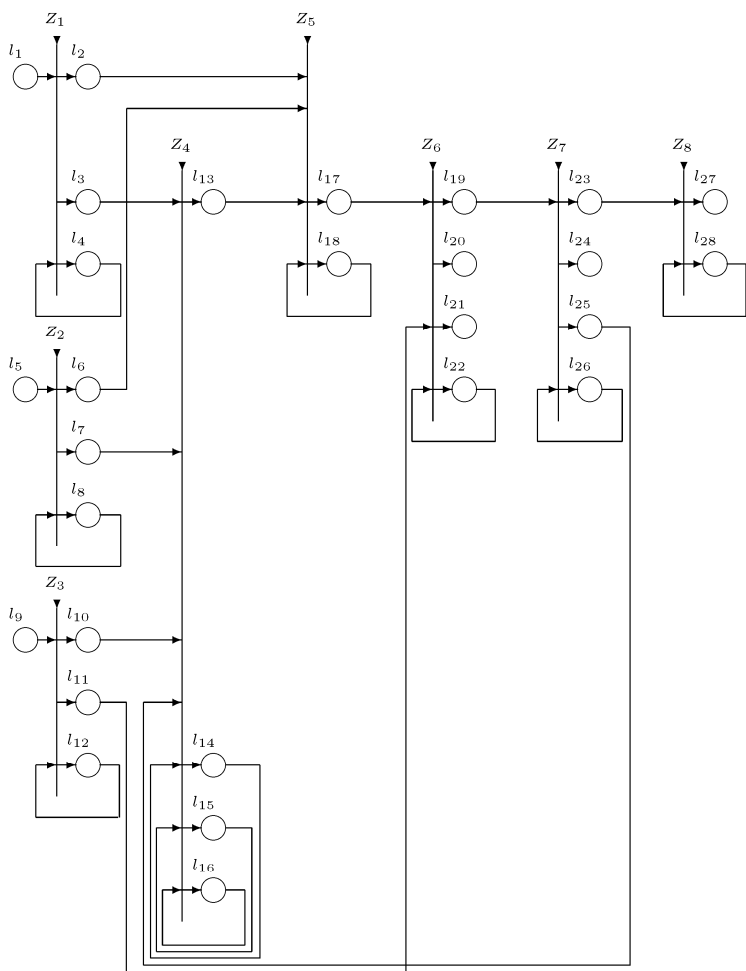
ОМ-моделът съдържа следното множество от преходи

$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7, Z_8\},$$

където преходите описват съответно:

- Получаване на механично, химично и физикохимично пречистени отпадъчни води (промишлени или битови) – преход Z_1 ;
- Контрол на биологичния процес на пречистване – преход Z_2 ;
- Функциите на компресора за O_2 – преход Z_3 ;
- Процесите на въглеродна асимилация и нитрификация – преход Z_4 ;
- Процес на денитрификация – преход Z_5 ;
- Функциите на деаератора – преход Z_6 ;
- Събирането на вторичния утайтел – преход Z_7 ;
- Функциите на водоприемника – преход Z_8 .

Пълното описание на мрежата е представено в [3].



Фиг. 11. ОМ-модел на биологично стъпало в пречиствателна станция за отпадъчни води

5.4. Изводи

В тази глава са представени разработените ОМ-модели на отделни основни стъпала в пречиствателна станция за отпадъчни води – механично, физикохимично и биологично. Разработеният ОМ-модел на механичното стъпало описва в детайли процесите, протичащи в етапа на механично пречистване в една пречиствателна станция за отпадъчни води. Той осигурява възможност за проследяване работата на отделните съоръжения в технологичния процес, което е от особена важност за ефективната работа на това стъпало, гарантиращо ефективния старт на пречиствателните процеси, като първи етап в обработването на водите.

ОМ-моделът на физикохимичното стъпало описва измененията на отделните качествени характеристики на пречистваните води, преди и след конкретни съоръжения в процеса на физикохимично третиране на водите. Той дава възможност да се проследят много точно протичащите процеси и да се осигурят оптимални условия за максимална ефективност на пречистването.

Разработеният ОМ-модел на биологичното стъпало позволява да се моделират в дълбочина многообразните, специфични и сложни процеси на биоразграждането, което е в основата на биологичното пречистване на отпадъчните води. Освен това ОМ-моделът дава възможност да се проследи и отчете точно въздействието на някои фактори, влияещи върху биологичното пречистване.

Разработените ОМ-модели спомагат за значителното снижаване на разходите на пречистване при постигане на индивидуалните емисионни ограничения на замърсителите в заустваните отпадъчни води.

Представените в тази глава резултати са публикувани съответно в:

- ОМ-модел на механично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води:
 1. **Georgieva V.**, Generalized Net Model of Mechanical Wastewater Pre-treatment, *International Journal Bioautomation*, Vol. 21(1), 2017, 133-144.
- ОМ-модел на физикохимично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води:
 2. **Georgieva V.**, O. Roeva, T. Pencheva, Generalized Net model of Physics-chemical Wastewater Treatment, *Ecology & Safety*, 2015, Vol. 9, 468-475.
- ОМ-модел на биологично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води:
 3. **Georgieva V.**, E. Sotirova, Generalized Net Model of Biological Treatment of Wastewater, *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, 2014, Vol. 11, 63-72.

Глава 6

Симулиране на обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за отпадъчни води

Симулирането на работата на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води е обхванато в два етапа: 1) разработване на ОМ-модел в среда *Generalized Nets Integrated Development Environment* (GN IDE); 2) симулиране на разработения ОМ-модел на базата на реални данни от пречиствателна станция за отпадъчни води. За целите на симулирането на ОМ-модела в среда GN IDE се наложи преработка на детайлния ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води, представен в *Глава 4*. Предложеният в *Глава 4* ОМ-модел е модифициран в съответствие с наличните реални данни от процес на водопречистване, както и отчитайки спецификите на софтуерната среда GN IDE за симулиране на ОМ-модели.

6.1. Кратко описание на софтуерния пакет GN IDE за работа с ОМ

Софтуерните пакети за работа с ОМ претърпяват дълга технологична еволюция. Тя стартира още от началото на 80-те години на XX век и включва най-разнообразни платформи и езици за програмиране. Стремежът е веднъж създадени, ОМ-моделите да бъдат допълнително развивани чрез симулации в разработена за целта среда. Работата по тези софтуерни пакети продължава и към настоящия момент. Последната разработвана среда е GN IDE, която представлява графичен редактор и симулационно средство, разработено на Java. Приложението е платформено независимо и може да бъде използвано на компютри с произволни операционни системи.

Потребителският интерфейс GN IDE предоставя средства за:

- визуално изграждане на ОМ-модели;
- зареждане на предварително дефинирани ОМ-модели;
- редакция на ОМ-модели;
- стартиране на симулациите (постъпкови или непрекъснати);
- проследяване на изпълнението на симулациите;
- графично визуализиране на резултатите от симулациите;
- преработване на ОМ-моделите до файлове във формат *tex*.

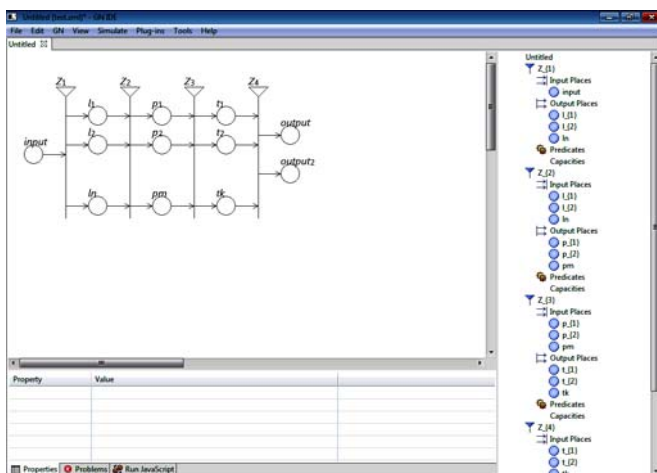
Приложението позволява и създаване на графики на използваните данни, като се избере определена характеристика или множество от характеристики на дадено ядро и се изчертават натрупаните в тях стойности.

Всеки модел се изгражда чрез последователно описание на преходите, позициите, ядрата и характеристичните функции. Структурата на ОМ-модела се дефинира посредством XML файл. XML файлът може да бъде създаден, както чрез директно описание в XML-а, така и чрез изрисване на ОМ-модела посредством GN IDE. GN IDE поддържа задаване на характеристични функции на програмен език Java Script, конзола, която позволява тестване на създадения код и достъп до всеки елемент на мрежата

в Java Script кода, чрез обекта *gn*. Всеки от създадените модели може да бъде експортиран до *tex* формат, а софтуерният продукт поддържа връзка с Matlab.

Софтуерът разполага с два изгледа – *графичен* и *дървовиден*. *Графичният изглед* е мястото, където се изчертават и визуализират моделите. Изчертаването може да се извършва както чрез движение на мишката, така и чрез създадените менюта. *Дървовидният изглед* описва йерархично дефинирания модел. Той спомага за визуализация на връзките между отделните компоненти на мрежата. Всички характеристики на избран компонент се виждат и могат да бъдат променени от панела, намиращ се непосредствено под *графичния изглед*. Основните характеристики, важащи за всички обекти, са идентификатор и име. Всеки от компонентите на мрежата има и допълнителни характеристики, необходими за неговата дефиниция, съответстващи на тези в теорията на обобщените мрежи. Софтуерът поддържа алгоритъм за функциониране на преход, където разцепването и сливането на ядрата е позволено. Разцепването и сливането на ядрата може да се позволи или да се забрани чрез флагове към ядрата и позициите.

В GN IDE е вграден GN Ticker, който представлява симулационен сървър на OM. GN Ticker посочва по дадена OM какви събития настъпват в мрежата след определен брой стъпки. Той е разработен на C++ в обектноориентиран стил и използва GN Characteristic Function Language (GNTCFL). GNTCFL е език със синтаксис, подобен на Lisp, разработен специално за GN Ticker. GNTCFL представлява съвкупност от дефиниции на функции, които могат да бъдат използвани като специфични функции и предикати, както и като дефинирани от потребителя полезни функции. Използваните от потребителя приложения, като визуалните среди за графична обработка и въвеждане на потребителски данни, обменят информация със симулационното ядро чрез TCP/IP връзка и специално проектираният GN Ticker Trace Protokol.



Фиг. 12. Изглед на OM-модел в GN IDE среда

GN IDE съдържа изгледи „Графика“, „Йерархия“, „Свойства“ и „Функции“. Изгледът „Графика“ позволява визуализацията на модела (Фиг. 12). Изгледът „Йерархия“ показва компонентите на модела, подредени в йерархичен вид. Изгледът „Свойства“ показва и позволява редактирането на всяко свойство на избраните компоненти от изгледа „Графика“. Изгледът „Функции“ отваря текстов редактор, съдържащ всички характеристични и предикатни функции.

ОМ-моделът може да бъде представен в *gn xml (xgn)* файл, който описва преходите, местата за вход и изход, характеристичните и предикатните функции. Друга възможност е моделът да бъде създаден в GN IDE. Тогава той може да бъде запазен и в *xml* файл, а всеки *gn xml* файл може да бъде отворен и изтеглен чрез IDE. Всеки преход съдържа входни елементи, изходни елементи и върхове с предикати. Всеки входен и изходен елемент има препратка към специфична позиция и връзка между позицията и прехода. Върхът с връзка съдържа последователност от местоположения. Всяка позиция и всяко ядро са описани от връх, без дъщерни върхове, и от определени свойства. Върхът с функция включва всички характеристики и предикатни функции като текстов коментар, заобиколен от `<![CDATA[functions]]>`.

Когато моделът е създаден и отворен в GN IDE, симулацията може да бъде стартирана чрез бутона „Simulate“ (Фиг. 12) или чрез натискане на F8.

6.2. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за отпадъчни води в среда GN IDE

Разработеният ОМ-модел описва основна технологична схема на пречиствателна станция, включваща трите главни фази в обработката на отпадъчни води – механично, физикохимично и биологично пречистване.

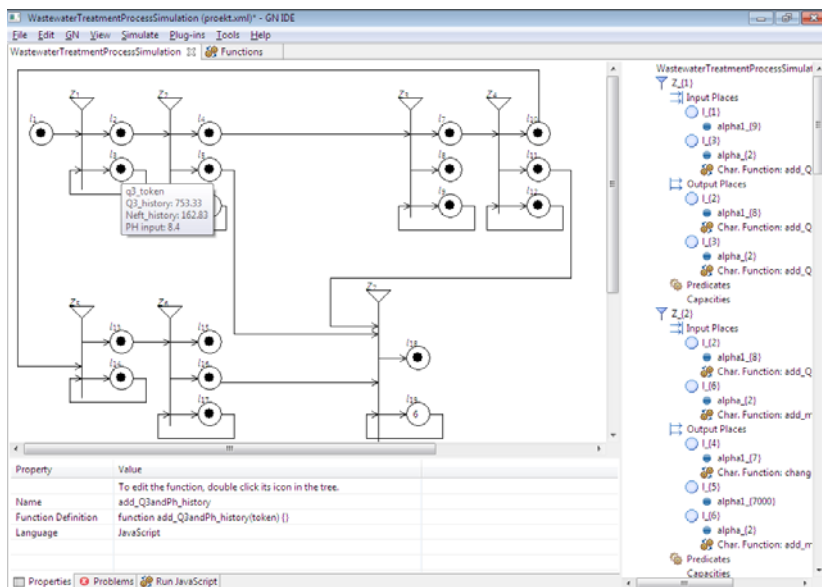
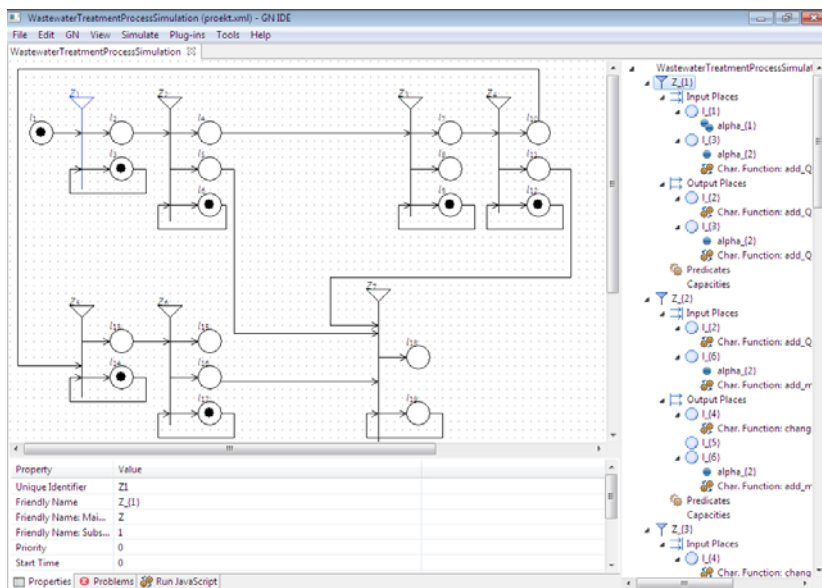
Представеният на Фиг. 14 ОМ-модел съдържа 7 прехода:

$$A = \{Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6, Z_7\},$$

които описват:

- Процесът на механично пречистване:
 - o получаване на замърсените отпадъчни води – преход Z_1 ;
 - o прецеждане на отпадъчните води с цел премахване на едрите примеси – преход Z_2 ;
 - o пречистване в нефтоуловителя – преход Z_3 ;
 - o пречистване в първичния утайтел – преход Z_4 ;
- Процесът на физикохимично пречистване чрез напорна флотация – преход Z_5 ;
- Процесът на биологично пречистване:
 - o пречистване на отпадъчните води в биобасейн с въглеродна асимилация – преход Z_6 ;
 - o обработване на утайките – преход Z_7 .

В резултат на изпълнението на ОМ-модела, потокът на обработваната вода стига до изходна позиция като пречистена вода. Освен пречистената вода, на изхода на пречиствателната станция (ОМ-модела) достигат и обработените утайки (в съответната им изходна позиция в модела).



Фиг. 15. Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция за отпадъчни води в среда GN IDE

```

1 <?xml version="1.0" ?>
2 <gn xmlns="http://www.clbme.bas.bg/GN" name="WastewaterTreatmentProcessSimulation" time="256" timeStart="0" timeStep=
3 <transitions>
4 <transition id="Z1" name="Z_1" priority="0" startTime="0" lifeTime="-1" positionX="90" positionY="60" sizeY="11
5 <inputs>
6 <input ref="11">
7 <arc>
8 <point positionX="40" positionY="90"/>
9 <point positionX="90" positionY="90"/>
10 </arc>
11 </input>
12 <input ref="13">
13 <arc>
14 <point positionX="140" positionY="135"/>
15 <point positionX="170" positionY="135"/>
16 <point positionX="170" positionY="165"/>
17 <point positionX="75" positionY="165"/>
18 <point positionX="75" positionY="135"/>
19 <point positionX="90" positionY="135"/>
20 </arc>
21 </input>
22 </inputs>
23 <outputs>
24 <output ref="12">
25 <arc>
26 <point positionX="90" positionY="90"/>
27 <point positionX="140" positionY="90"/>
28 </arc>
29 </output>
30 <output ref="13">
31 <arc>
32 <point positionX="90" positionY="135"/>

```

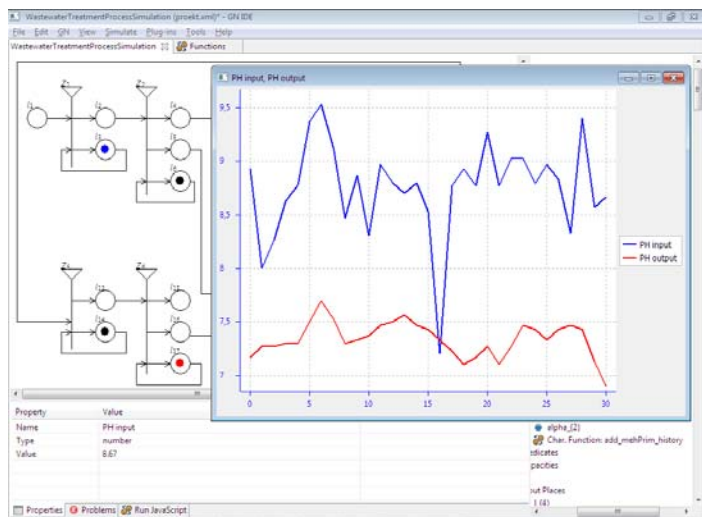
Фиг. 16. Фрагмент от *xml* файла
на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води

Събраните изходни данни от ОМ-модела са използвани за по-нататъшен анализ на протичането на процесите на пречистване на отпадъчни води. По-долу са представени измененията на някои от следените параметри по време на процеса на пречистване за месеците *януари*, *юни* и *октомври*. Тези месеци са избрани като представителни за характеристиките на водопречиствателните процеси по време на различните сезони.

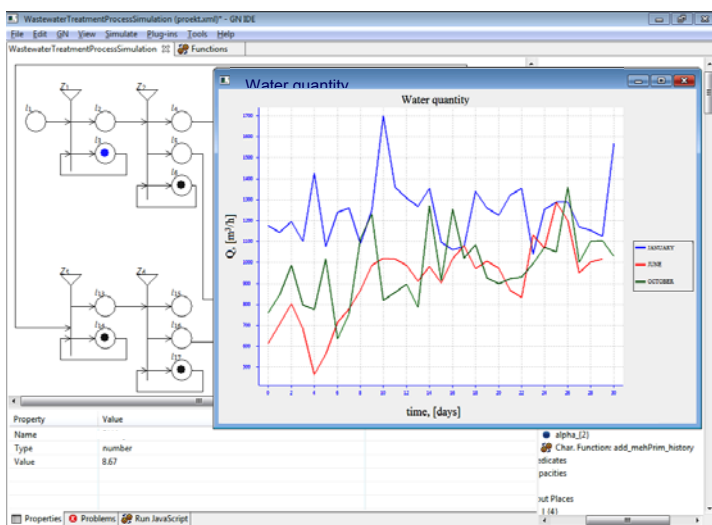
Реализирано е получаването на графично изображение на наблюдаваните параметри на процеса на водопречистване по време на симулацията. Като пример, на Фиг. 17а е представена динамиката на параметъра *pH* на отпадъчните води, а на Фиг. 17б е представена динамиката на количеството на отпадъчните води по време на симулацията.

Фиг. 18 представя изменението на количеството отпадъчни води, постъпващи в пречиствателната станция в рамките на всеки от избраните месеци.

Съвсем закономерно се наблюдава сезонната зависимост на отпадъчните води, показваща типичен *януарски* максимум – месеца с най-голяма снежна покривка. Летният минимум на количеството отпадъчни води е типичен за *юни*. За всеки сезон изпъква определен екстремум в количествата, който се определя от взаимовръзката с атмосферната вода (чрез процеса разреждане). Това обуславя присъствието на общи смесени потоци от отпадъчни и атмосферни води.

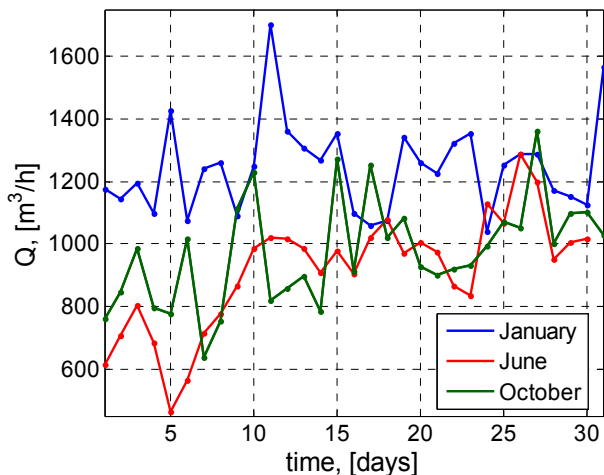


а) динамика на pH на водата



б) динамика на количеството на отпадъчните води

Фиг. 17. Визуализация по време на симулацията на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води

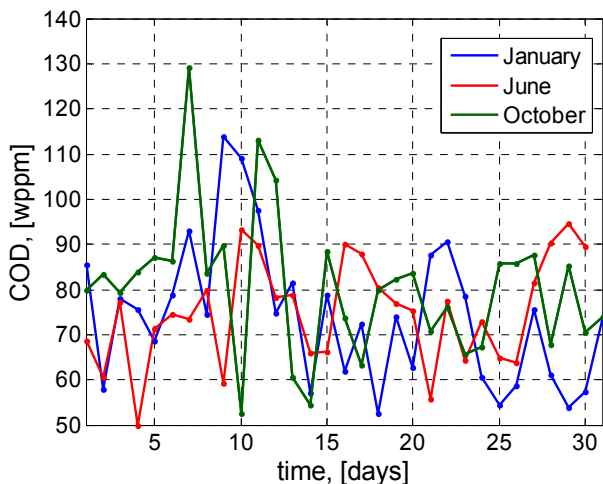


Фиг. 18. Изменение на количествата на отпадъчни води, постъпващи в пречиствателната станция

Като възможност за евентуално оптимизиране на процеса може да бъде потърсено технологично решение чрез разделяне на водния поток на два отделни потока. Първият от тях – хомогенен непрекъснат поток от замърсени отпадъчни води, би могъл да мине през пълното пречистване от технологичната схема, докато вторият поток – по-слабо замърсен поток от атмосферни води, да бъде подложен на частично пречистване.

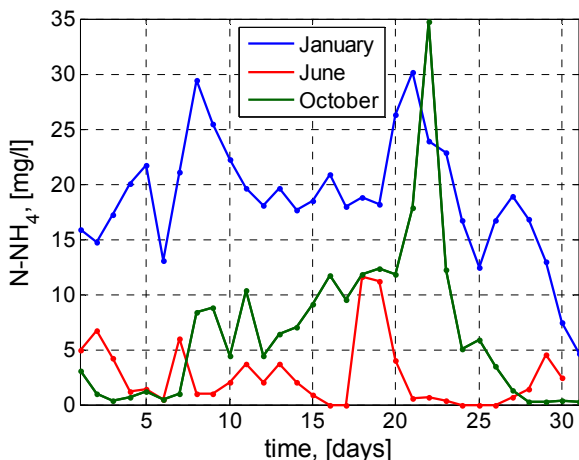
Симулираните стойности на ХПК (chemical oxygen demand, COD) на водите при входа на биологичното съпало за месеците *януари*, *юни* и *октомври* са представени на Фиг. 19.

Забелязва се ясна тенденция от екстремуми през отделните месеци, като максималните стойности на ХПК са типични за летния период. Това наблюдение се обяснява с минималното количество вода с по-висока концентрация на органични замърсители, което води до някои максимални стойности на ХПК. Задържането на параметъра в относително тесен интервал би довело до равномерен ход на работата на технологичните съоръжения. Това може да бъде постигнато чрез построяване на буферна станция. Достигнатите заключения от анализа на количеството на отпадъчните води са валидни също и тук. Откроява се тенденция във влиянието на атмосферните води върху концентрациите на ХПК.



Фиг. 19. Изменение на стойностите на ХПК

Концентрациите на N-NH_4 на водите при входа на биологичното стъпало за месеците *януари*, *юни* и *октомври* са представени на Фиг. 20.

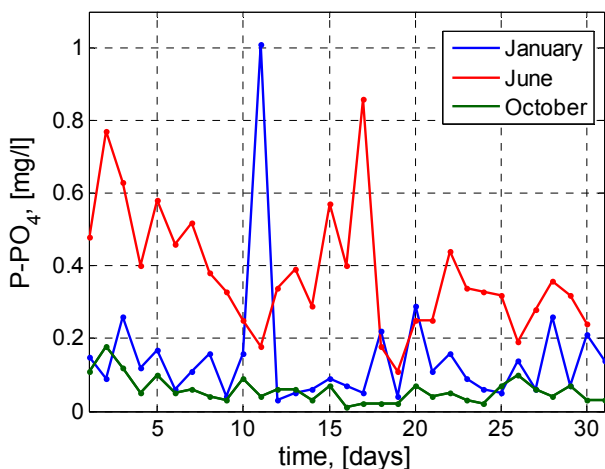


Фиг. 20. Изменение на концентрацията на N-NH_4

Максималните стойности на концентрациите на замърсителите се достигат през *януари*, т.е. присъствието на максимална концентрация на замърсителя в максималното количество на водата водят до заключението, че замърсителят е технологичен. Поради тази причина, той би трябвало да бъде

отделен и елиминиран преди да попадне в основния поток от отпадъчни води. Високата концентрация на замърсителя и големия дебит на отпадъчните води през *януари*, комбинирана с ниските температури, може да повлияе силно отрицателно върху процеса на биологично пречистване в пречиствателните станции и съответно върху икономическия ефект.

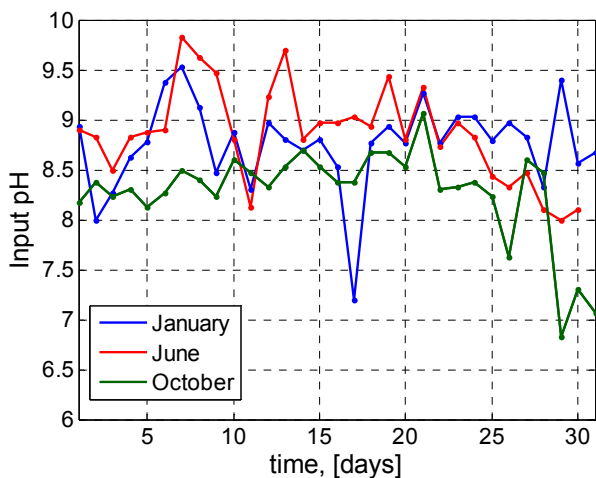
Концентрациите на $P-PO_4$ (фосфор като фосфати) на водите на изхода на пречиствателната станция за месеците *януари*, *юни* и *октомври* са представени на Фиг. 21.



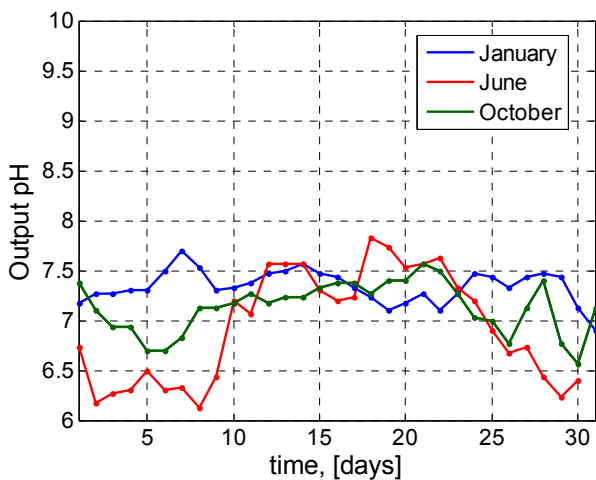
Фиг. 21. Концентрация на $P-PO_4$ във водата на изход на пречиствателна станция за отпадъчни води

Предвид внасянето фосфор под формата на фосфати като биогенен елемент на вход на биологичното стъпало (за поддържане на константна концентрация), наличието на ясно отличим средномесечен максимум през м. *юни* маркира проблем в работата на биологичното стъпало. Поради тази причина е необходимо през летните месеци провеждане на лабораторен микробиологичен анализ по отношение на активната утайка (органично натоварване на утайката, фаза на растеж, активност на активната утайка/дехидрогеназа, кислороден (респираторен) режим и др.). Това ще осигури оптимизиране на количествата добавян биогенен елемент (фосфор) при поддържането на стабилен технологичен режим на биологичното стъпало и съответно минимизиране на разходите.

Получените стойности на pH на водите при входа и изхода на пречиствателната станция са представени на Фиг. 22а и Фиг. 22б, съответно за месеците *януари*, *юни* и *октомври*.



а) вход



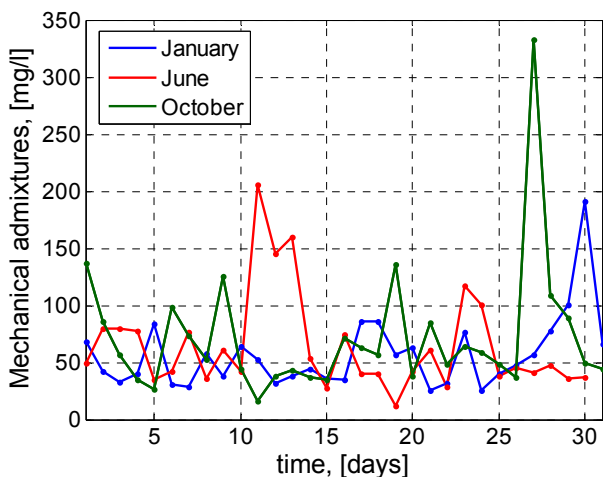
б) изход

Фиг. 22. рН на вход и изход на пречиствателна станция за отпадъчни води

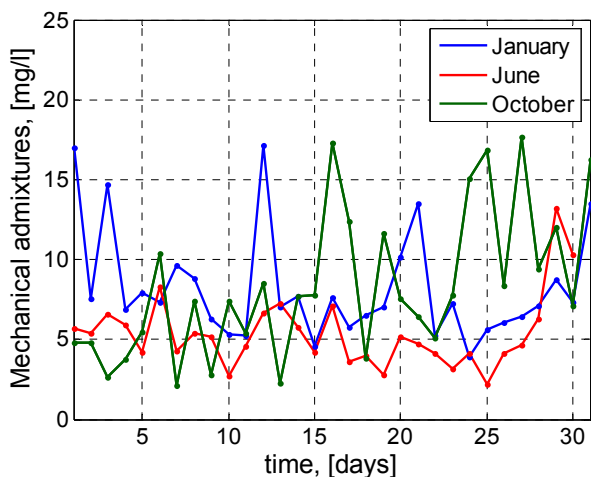
Както се вижда от фигурите, е налице възможност за буфериране системата и междинно преобразуване на екстремумите. Понижението на рН на изход е свързано с изпълнението на биологичните процеси и се явява като индикатор за нитрификационни процеси, комбинирани с въглеродна

асимиляция, които могат да бъдат разгледани като възможна оптимизация за етапа на биологичното пречистване.

Получените стойности на механичните примеси на водите при входа и изхода на пречиствателната станция са представени на Фиг. 23а и Фиг. 23б, съответно за месеците *януари*, *юни* и *октомври*.



а) вход



б) изход

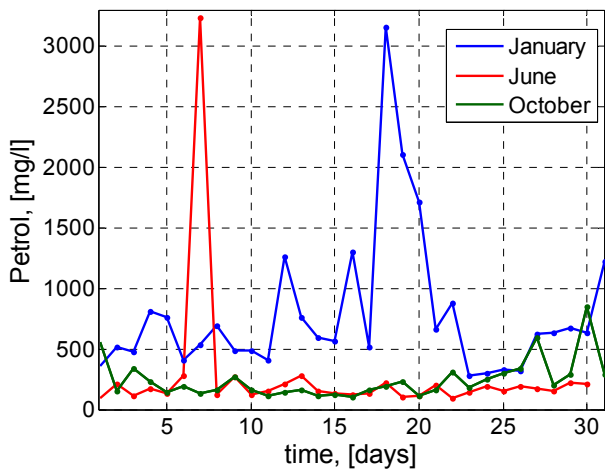
Фиг. 23. Механични примеси във водата на вход и изход на пречиствателна станция за отпадъчни води

Както се вижда от фигурите, съществува буфериране в системата и разсъгласуваност между входа и изхода с междинно преобразуване на екстремумите. Доколкото механичните примеси на вход се отстраняват в механичното и физикохимично стъпало на пречиствателната станция, то механичните примеси на изход (след биологичното стъпало) могат да имат и друг характер и следва да се търси причината в работата на биологичното стъпало (биобасейн – вторичен утайтел). Тези механични примеси на изход са резултат от протичащите биологични процеси, водещи до унос на биомаса в отпадъчните води след вторичните утайтели. Необходимо е провеждане на микробиологичен лабораторен анализ на активната утайка – калов индекс, органично натоварване на утайката, биогенни елементи (азот, фосфор, сяра и микроелементи), кислороден режим и установяване евентуалното протичане на нежелан процес на денитрификация, водеща до флотирание на утайката в утайтелите и др. Така получените резултати за фактора механични примеси служат като индикатор за протичане на описаните процеси и би следвало да се използват за оптимизиране и прогнозиране работата на биологичното стъпало, предвид факта, че то е с най-висока относителна цена за отстраняване на единица замърсител. Много често то е крайно стъпало в пречиствателната станция, от чиято ефективната и ефикасна работа се определя работата на цялата станция.

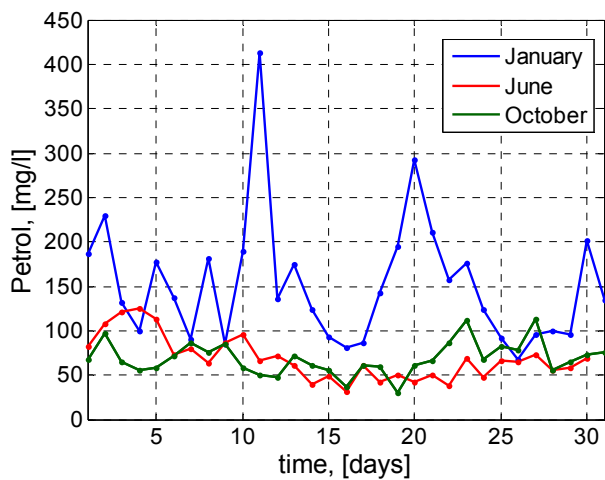
Концентрациите на петролния замърсител за месеците *януари, юни и октомври* по отделните пречиствателни съоръжения са представени на Фиг. 24а, 24б, 24в, 24г и 24д.

Максималните стойности на концентрациите на замърсителите се достигат през *януари*, т.е. присъствието на максимална концентрация на замърсителя в максималното количество на водата потвърждава, че замърсителят е технологичен. Наличието на ясен отклик на замърсителя по цялата верига на пречиствателните съоръжения е потвърждение за работа на всяко от тях в границите на технологичните ограничения за степен на пречистване и ограничените възможности за буфериране и снижаване на екстремумите.

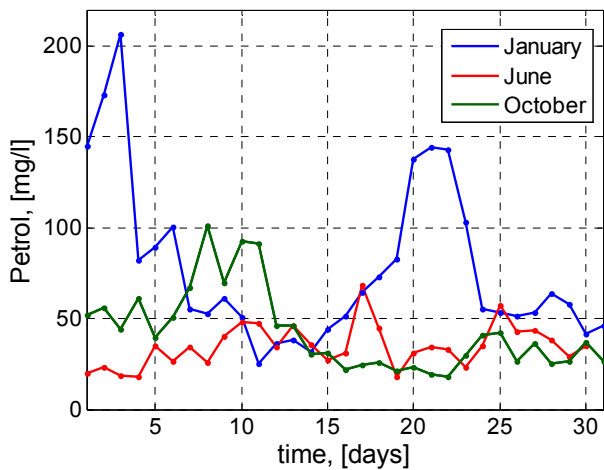
Симулационният модел води до възможност за прогнозиране на предприеманите действия спрямо очакваните стойности през представителните сезонни месеци. Действията са необходими за технологичното оптимизиране на процесите в отделните пречиствателни съоръжения (особено при комбиниране по всички замърсители) или за предварителната им настройка като буфериране, време на престой на отпадъчните води/замърсител, включване-изключване на отделни секции, рецикулационни отношения в биобасейни, промяна на режими по органичното/петролно натоварване, рН и т.н. Крайната цел е, от една страна, снижение на производствените разходи, и от друга, евентуални бъдещи инвестиции в пречиствателните съоръжения или производствените процеси, генериращи замърсителите.



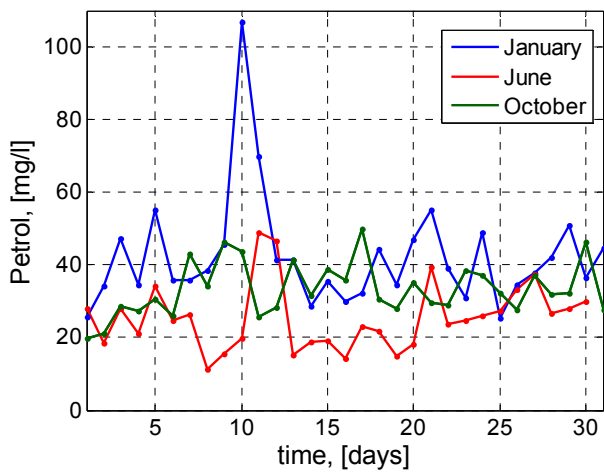
а) на входа на пречиствателната станция



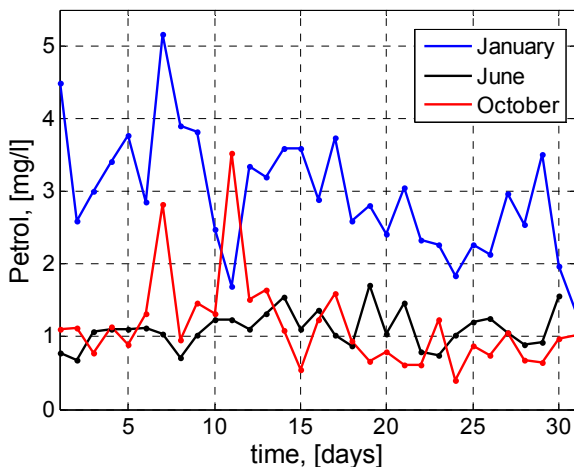
б) след пречистването в нефтоуловителя



в) след пречистването в първичния утаител



г) на вход на биологичното стъпало



д) на изход на биологичното стъпало

Фиг. 24. Количество петрол, измерено във водата

6.4. Изводи

Разработен е ОМ-модел на типова пречиствателна станция за отпадъчни води. Това е първият ОМ-модел на процес на пречистване на отпадъчни води, разработен и симулиран чрез използване на GN IDE среда.

Наблюдавани са стойностите на различни параметри, свързани с качеството на отпадъчните води по време на симулацията на представения ОМ-модел. В частност са проследени стойностите на неразтворени примеси, специфични замърсители (амоняк, нитрати, нитрити), органични замърсители (ХПК, БПК), pH, фосфати и т.н. Характеризирани са някои сезонни зависимости на наблюдаваните параметри на база на симулациите на ОМ-модела. По този начин създадения ОМ-модел позволява цялостен и времеви анализ на отделните процеси в пречиствателната станция. ОМ-моделът води и до възможност за прогнозиране на предприеманите действия спрямо очакваните стойности през представителните сезонни месеци. В резултат, приложението GN IDE, представено в това изследване, дава възможност за дискусия на някои технологични решения за оптимизация на водопречиствателния процес.

Представените в тази глава резултати са публикувани в:

1. **Georgieva V.**, N. Angelova, O. Roeva, T. Pencheva, Simulation of Parallel Processes in Wastewater Treatment Plant Using Generalized Net Integrated Development Environment, *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 2016, 69(11), 1493-1502.

Заклучение

Обобщените мрежи представляват мощен инструмент за моделиране и оптимизация на паралелно протичащи във времето процеси. Създадените десетки ОМ-модели на процеси от различни области доказват ефикасността му при генериране на решения, оценки, прогнозиране и разширяване на знанията за определен проблем.

Дисертационният труд е посветен на приложението на тази бързо развиваща се област от информатиката – теорията на ОМ, за моделиране на процеси на пречистване на води. В него са представени резултатите от разработването на първите ОМ-модели на пречиствателна станция за природни води и на пречиствателна станция за отпадъчни води. Новоразработени и представени са ОМ-модели на отделни стъпала в технологичната схема на пречиствателна станция за отпадъчни води – механично, физикохимично и биологично.

Представените ОМ-модели дават възможност да бъдат анализирани в дълбочина процесите на пречистване, като осигуряват проследяване стойностите на различните параметри, свързани със замърсяването на водите. Всички разработени ОМ-модели позволяват провеждането на непрекъснат контрол над работата на съоръженията, като осигуряват условия за бърза оценка на ефективността им. Това спомага за подобряване на възможността за оптимизиране на работата на включените в технологичните схеми апарати и съоръжения, което от своя страна би могло да доведе и до оптимизацията на технологичния процес на пречистване на водите и снижение на разходите за реализиране на процесите.

За първи път е симулирана работата на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води в среда GN IDE на базата на реални данни. По време на симулацията са наблюдавани стойностите на различни параметри, свързани с качеството на отпадъчните води. В частност са проследени стойностите на неразтворени примеси, специфични замърсители (амоняк, нитрати, нитрити), органични замърсители (ХПК, БПК), рН, фосфати и др. Реализираното графичното изображение на параметрите по време на симулацията осигурява възможността за следене динамиката им в реално време. Характеризирани са някои сезонни зависимости на наблюдаваните параметри на база на симулациите на ОМ-модела. По този начин създадения ОМ-модел позволява цялостен и времеви анализ на отделните процеси в пречиствателната станция. Не на последно място, симулирането на разработените модели с реални експериментални данни позволява да се направят прогнози за критични моменти или ситуации, да се планира разпределението на ресурси, материална база, апаратура и др. Представената в дисертационния труд симулация демонстрира предимствата на разработения ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води в среда GN IDE във връзка с възможността за предлагане на някои технологични решения за оптимизация на водопречиствателния процес.

Приноси в дисертационния труд

Приноси с научно-приложен характер:

1. Разработени са нови обобщеномрежови модели на станции за пречистване на води:

- ОМ-модел на пречиствателна станция за кондициониране на природни води;
- ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води.

Предложените модели дават възможност за наблюдение в реално време на важни параметри на описаните в ОМ-моделите процеси. Представените ОМ-модели могат да послужат за взимане на решения за оптимално протичане на описаните процеси.

2. Разработени са нови обобщеномрежови модели на основни етапи от технологичната схема в пречиствателна станция за отпадъчни води:

- ОМ-модел на механично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води;
- ОМ-модел на физикохимично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води;
- ОМ-модел на биологично стъпало на пречиствателна станция за отпадъчни води.

Предложените ОМ-модели дават възможност за наблюдение в реално време на конкретни процеси от различните технологични стъпала в пречистването на води. Представените ОМ-модели могат да послужат за взимане на решения за оптимално протичане на описаните подпроцеси.

Приноси с приложен характер:

3. Реализирана е симулация на ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води:

- Разработен е ОМ-модел на пречиствателна станция за отпадъчни води в среда *Generalized Net Integrated Development Environment* (GN IDE).
- Разработеният ОМ-модел е симулиран в среда GN IDE на базата на реални данни, с което е реализирана възможността за наблюдение в реално време на важни параметри на процесите на пречистване на отпадъчни води.

Списък на публикациите по дисертационния труд

1. **Georgieva V.**, Generalized Net Model of the Process of Fresh Water Treatment, *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, 2013, Vol. 10, 163-172.
2. **Георгиева В.**, Обобщеномрежов модел на пречиствателна станция на води, *Годишник на Секция "Информатика", Съюз на учените в България*, 2013, Том 6, 68-75.
3. **Georgieva V.**, E. Sotirova, Generalized Net Model of Biological Treatment of Wastewater, *Issues in Intuitionistic Fuzzy Sets and Generalized Nets*, 2014, Vol. 11, 63-72.
4. **Georgieva V.**, O. Roeva, T. Pencheva, Generalized Net model of Physics-chemical Wastewater Treatment, *Ecology & Safety*, 2015, Vol. 9, 468-475.
5. **Georgieva V.**, N. Angelova, O. Roeva, T. Pencheva, Simulation of Parallel Processes in Wastewater Treatment Plant Using Generalized Net Integrated Development Environment, *Comptes rendus de l'Academie bulgare des Sciences*, 2016, 69(11), 1493-1502.
6. **Georgieva V.**, Generalized Net Model of Mechanical Wastewater Pre-treatment, *International Journal Bioautomation*, Vol. 21(1), 2017, 133-144.

