

**БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
ИНСТИТУТ ПО ИНЖЕНЕРНА ХИМИЯ**

РАЙКА КИРИЛОВА ВЛАДОВА

**ПОВИШАВАНЕ НА УСТОЙЧИВОСТТА И
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТТА НА ПРОИЗВОДСТВЕНИ
СИСТЕМИ С ПЕРИОДИЧНИ ПРОЦЕСИ НА
ПРИМЕРА НА СИСТЕМА ЗА АВТОТЕРМАЛНО
ТЕРМОФИЛНО АЕРОБНО ПРЕЧИСТВАНЕ (АТАД)
НА ОТПАДЪЧНИ ВОДИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд,
за присъждане на научно-образователната степен “ДОКТОР”

**Научна специалност: 4.2 Химически науки
"Процеси и апарати в химичната и биохимичната технология"**

**Научен ръководител:
Проф. д-р Наташа Ваклиева-Банчева**

София, 2017 г.

Дисертационният труд е обсъден на колоквиум на ИИХ-БАН, състоял се на 11.05.2017 г. и допуснат до защита след заседание на НС на ИЕЕС на 19.05.2017 г.

Дисертационният труд съдържа увод, пет глави, заключение – приноси на дисертацията, списък на цитираната литература и списък на авторските публикации по темата на дисертационния труд. Обемът на дисертационния труд е 180 стр., включително 30 фигури и 20 таблици. В библиографската справка са включени 177 заглавия, от които 2 са на кирилица и 175 на латиница. Номерата на използваните в автореферата фигури и таблици съвпадат с тези в дисертацията.

Докторантката работи като асистент в Института по инженерна химия при Българска академия на науките. Зачислена е в редовна докторантура в лаборатория ”Инженерно-химична системотехника” през 2014 година, като всички изследвания по дисертацията са реализирани в същата лаборатория.

Официалната защита на дисертацията ще се състои на от часа в заседателната зала на Институт по инженерна химия, БАН, ул. „Акад. Г. Бончев”, бл. 103 на открито заседание на научното жури в състав:

1. Проф. д-р Наташа Ваклиева-Банчева
2. Проф. д-тн Боян Иванов
3. Проф. д-тн Стоян Стоянов
4. Проф. д-р Николай Козарев
5. Проф. д-тн Богдана Куманова

Резервни членове:

Проф. д-тн Венко Бешков

Проф. д-тн Христо Бояджиев

Материалите по защитата са на разположение на заинтересованите в Канцеларията на ИИХ-БАН, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 103.

СЪДЪРЖАНИЕ

	Основни съкращения	5
	УВОД	6
ГЛАВА 1	ИЗВОДИ ОТ ЛИТЕРАТУРНИЯ ОБЗОР	6
ГЛАВА 2	ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД	8
ГЛАВА 3	ЕНЕРГИЙНА ИНТЕГРАЦИЯ НА ПОТОЦИТЕ В АТАД СИСТЕМИ	9
3.1.	Описание на изследвания обект	9
3.2.	Интеграционна рамка	11
3.3.	Математично описание на процеса на енергийна интеграция на потоците в АТАД система	12
3.3.2.	<i>Математично описание на топлообмена в нагриващата част</i>	13
3.3.3.	<i>Математично описание на топлообмена в охлаждащата част</i>	13
3.3.4.	<i>Обединение на двата модела</i>	14
3.4.	Анализ на ефективността на енергийната интеграция на границите на стохастичното пространство	14
3.4.2.	Независими променливи	15
3.4.3.	<i>Математичен модел</i>	15
3.4.4.	<i>Оптимизационен критерий</i>	15
3.4.5.	<i>Резултати от анализа</i>	16
3.5.	Изводи	16
ГЛАВА 4	СИСТЕМНО-ОРИЕНТИРАН ПОДХОД ЗА ОПТИМАЛНА РЕКОНСТРУКЦИЯ НА ЕНЕРГИЙНО ИНТЕГРИРАНА АТАД СИСТЕМА ЗА РЕДУЦИРАНЕ НА ВЪЗДЕЙСТВИЯТА НА СТОХАСТИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ	18
4.1.	Дискретизация на несигурното пространство	18
4.1.1.	<i>Евристичен метод за редуциране на броя на сценариите при двустадийното стохастично програмиране, метод на Karupiah et al., (2010)</i>	18
4.1.2.	<i>Необходими данни за формулиране на стохастичната оптимизационна задача за АТАД системата</i>	19
4.2.	Двустадийно мултисценарийно стохастично програмиране за редуциране на въздействията на несигурните параметри в АТАД системата	20
4.2.1.	<i>Независими променливи</i>	20
4.2.2.	<i>Математична формулировка на задачата за проектиране на енергийно интегрираната АТАД система в условията на несигурност</i>	21
4.2.2.1.	<i>Математичен модел на енергийната интеграция</i>	21
4.2.2.2.	<i>Ограничения</i>	22

4.2.2.3.	<i>Целева функция</i>	23
4.3.	BASIC генетичен алгоритъм - средство за решаване на двустадийната задача на стохастичното програмиране	24
4.4.	Резултати от оптимизацията	26
4.4.1.	<i>Използвани данни</i>	26
4.4.2.	<i>Граници на променливите за първия и втория стадий</i>	27
4.4.3.	<i>Решения на двустадийната стохастична оптимизационна задача</i>	27
4.5.	Индекс на гъвкавост	28
4.5.1.	<i>Скалиране на хиперпространството и представяне на Индекса на гъвкавост</i>	29
4.5.2.	<i>Определяне на Индекса на гъвкавост за ATAD системата</i>	30
4.5.2.1.	<i>Необходими данни</i>	30
4.5.2.2.	<i>Независими променливи</i>	31
4.5.2.3.	<i>Математичен модел и целева функция</i>	31
4.5.2.4.	<i>Резултати</i>	32
4.6.	Изводи от четвърта глава	33
5.	ВЕРИФИКАЦИЯ НА ПРЕДЛОЖЕНИЯ СИСТЕМНО-ОРИЕНТИРАН ПОДХОД И ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ОПТИМАЛНИ И УСТОЙЧИВИ РАБОТНИ УСЛОВИЯ НА ЕНЕРГИЙНО ИНТЕГРИРАНИ ATAD СИСТЕМИ В УСЛОВИЯТА НА НЕСИГУРНОСТИ	35
5.1.	Моделиране на ATAD биореактори с изкуствени невронни мрежи	35
5.1.1.	<i>Общо описание на Изкуствените невронни мрежи</i>	35
5.1.2.	<i>Определяне на входовете и изходите за ANN модел на ATAD биореактор</i>	36
5.1.3.	<i>Архитектура и обучение на ANN модел на ATAD биореактор</i>	36
5.1.4.	<i>Валидиране на ANN модел на ATAD биореактор</i>	36
5.2.	Симулиране работата на енергийно интегрирана ATAD система	38
5.3.	Резултати от симулирането на енергийно интегрирана ATAD система с реални данни	39
5.3.1.	<i>Използвани данни</i>	39
5.3.2.	<i>Резултати от симулирането и тяхното сравнение с реални данни</i>	40
5.4.	Изводи от пета глава	42
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	43
	ПРИНОСИ	43
	Публикации в пълен текст на научни резултати по темата на дисертацията	45

Основни съкращения

ATAD	Автотермално термофилно аеробно разграждане
TS	Общо сухо вещество [<i>Total Dry Solids</i>]
VS	Летливите твърди вещества
ПСОВ	Пречиствателни станции за отпадъчни води
TAD	Температура на входящата утайка
GA	Генетичен алгоритъм [<i>Genetic Algorithms</i>]
CU	Местна валута
ANN	Изкуствени невронни мрежи [<i>Artificial Neural Network</i>]
CU	Сурова утайка
HE-h	Топлообменник за охлаждане на потока горещ „продукт“, изходящ от биореактор 2А, 2В
HE-c	Топлообменник за подгряване на постъпващата в системата студената сурова утайка
HS	Топлинен резервоар

УВОД

През последните години все по-широко внимание се обръща на мерките за опазване на околната среда, като законовите и екологичните норми са подложени на непрекъснати промени. За намаляване и стабилизиране на утайките в пречиствателните станции (ПСОВ) се използват анаеробни и аеробни процеси на разграждане. Автотермалното термофилно аеробно пречистване (Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion - ATAD) е процес за стабилизиране на утайки, при който от широка гама органични утайки се произвежда биотор клас А. Опазването на околната среда налага ефективно използване на енергийните ресурси и намаляване консумацията на енергия. При ATAD системите, като пример за периодичен процес, повишаването на устойчивостта и енергоефективността е значително по-сложно, поради наличието на преимуществено нископотенциална топлина на изход на втория биореактор. Оползотворяването на тази топлина е възпрепятствано от това, че потоците, кандидати за топлинна интеграция, се появяват периодично и се разминават във времето. Процесът на интеграция допълнително е усложнен от наличието на стохастични колебания в стойностите на параметрите на потоците, кандидати за участие в топлинната интеграция. В достъпната литература не са открити данни на изследвания за енергийна интеграция на периодични производствени системи, в условията на стохастични изменения на някои от параметрите на интегрираните потоци. Именно това е целта на настоящата работа.

1. Изводи от литературния обзор

На база направеният преглед на литературата могат да бъдат формулирани следните изводи:

- Автотермалното термофилно аеробно разграждане (ATAD) е нова технология за пречистване на битови отпадъчни води, подходяща за малки населени места и курортни селища. Процесът е автотермален и притежава способността да убива патогенните микроорганизми при работни условия. Характеризира се с висока реакционна скорост и малки размери на биореакторите. Индустриалната му реализация се осъществява в серия от два последователно свързани биореактора, в които при съответните работни температури се извършва стабилизация и пастьоризацията на утайката. Създадените до този момент лабораторни модели за описание на ATAD процесите, водят до сериозни неточности при адаптацията им за описание на процесите в индустриални ATAD биореактори. Това налага, за тяхното моделиране, да се използват други методи и подходи, за каквито в литературата информацията е оскъдна.
- Ежедневно част от обработената утайка се заменя със свежа необработена утайка. Температурата, количеството и съставът на новопостъпилите утайки, температурата на въздух, използван за аерация; и др. са външни несигурни

фактори, които оказват съществено въздействие върху устойчивостта и енергоефективността на АТАД системите. Съществени количества отпадна топлина се губи в околната среда с изнесения „продукт“ от последното реакторно стъпало. Топлинната интеграция на процесите в периодични производствени системи е пътят за повишаване на тяхната устойчивост и енергоефективност. Обаче, в достъпната литература практически липсват изследвания за енергийна интеграция на периодични производствени системи, които са силно чувствителни към случайната промяна на някои от входните параметри на интегрираните потоци.

- За да се уловят тези несигурности и да се гарантира ефективното оползотворяване на отпадъчната топлина за устойчива и енергоефективна работа на АТАД съоръженията, проблемът за топлинната им интеграция трябва да се разглежда като проблем на стохастичната оптимизация. Решаването на възникналите многопараметрични и стохастични оптимизационни задачи е свързано със създаването на нови алгоритми и ефективни изчислителни инструменти. Използването на генетичните алгоритми за справянето със стохастичните оптимизационни проблеми тепърва навлиза в специализираната литература и все още е един открит въпрос.

2. Цел и задачи на дисертационния труд

Съгласно изложеното дотук, **основната цел** на дисертационния труд е създаването на научно обоснован системно-ориентиран подход за подобряване на енергийната ефективност и устойчивост на производствени системи с периодични процеси в условията на стохастично променящи се параметри, чрез утилизацията на вътрешните енергийни ресурси на системите.

Обект на изследванията е конвенционална система за пречистване на битови отпадъчни води чрез автотермално термофилно аеробно пречистване (ATAD) на утайките. Избрана е, защото притежава всички характеристики на производствените системи с периодични процеси. Устойчивата ѝ работа е от съществено значение за качеството на третираните утайки. Работните ѝ условия са подложени на въздействието на много **стохастични фактори** като менящи се: температура, количество и състав на новопостъпилите за обработка отпадъчни води, както и температурата на изходящите от биореакторите “продуктови” потоци. Те предизвикват: 1) **неустойчиви работни температури** в първите реакторни стъпала и колебания на работните температури в цялата система; 2) **термичен шок** върху термофилните микроорганизми, и 3) **освобождение на съществени количества нископотенциална топлина** в околната среда.

Задачи, които са решени в дисертационния труд са:

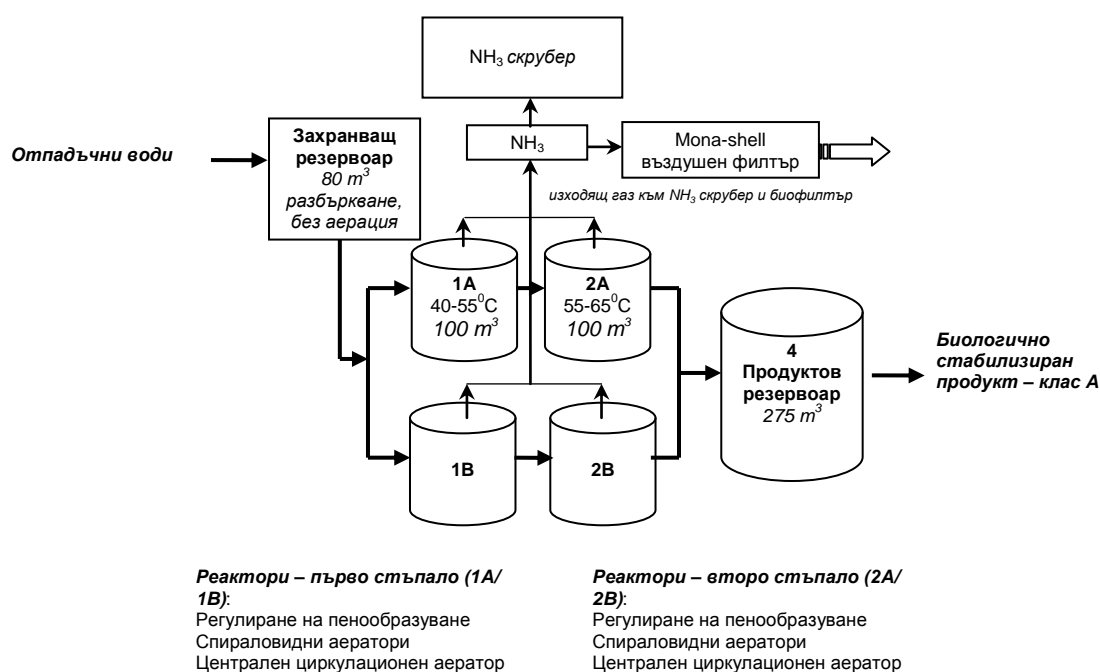
1. Анализ на възможностите за енергийна интеграция на потоците в ATAD системи.
 - Определяне на интеграционната рамка.
 - Създаване на математичен модел за описание на енергийната интеграция за изследвания обект.
2. Създаване на системно-ориентиран подход за оптимална реконструкция на енергийно интегрирана ATAD система за редуциране на въздействията на стохастичните параметри
 - Дефиниране на задачата за реконструкция в термините на двустадийно мултисценарийно стохастично програмиране.
 - Създаване на метод и алгоритъм за едновременното решаване на двустадийния многосценарийен оптимизационен проблем с помощта на Генетични алгоритми.
 - Определяне на индекса на гъвкавост за получените решения.
3. Верификация на предложения системно-ориентиран подход и определяне на оптимални устойчиви работни условия на енергийно интегрирани ATAD системи в условията на несигурност.
 - Моделиране на биореакторите в ATAD системата с помощта на невронни мрежи (ANN) и включването им в интеграционната рамка.
 - Симулиране работата на енергийно интегрирана ATAD система с реални данни и отчитане на качеството на обработване на утайките.

3. Енергийна интеграция на потоците в ATAD системи

3.1. Описание на изследвания обект

Обектът на изследване е индустриална конвенционална ATAD система за пречистване на битови отпадъчни води¹. В нея се преработва вторична утайка, която е смес от две или три различни (сезонно вариращи) вторични системи за пречистване.

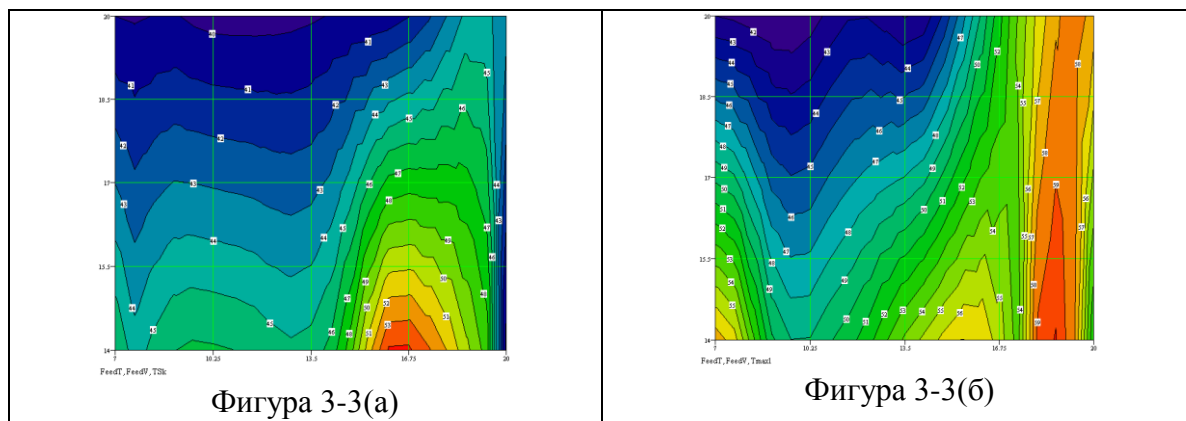
Системата се състои от 4 идентични биореактора с работен обем от 100 m³. Реакторите са организирани в две независими серии от по два реактора (фигура 3-1.) Реакторите от първото стъпало на всяка серия 1A (1B) са предназначени за стабилизацията на утайката, а необходимата работна температура е $\approx 55^{\circ}$, докато тези от второто стъпало - 2A (2B), се използват за пастъоризация, при необходима работна температура от $\approx 65^{\circ}$ C.



Фигура 3-1. Схема на двустадийна ATAD система.

По време на работа на биореакторите от двете стъпала ежечасно се следи температурата вътре в тях, за да се определи дълбочината на термичния шок, на който са подложени термофилните микроорганизми. На фигура 3-3, използвайки стойностите на реално измерените данни, са представени еквипотенциалните повърхнини на пада на температурите (дълбочината на TSk) (Фиг. 3-3(a)) и достигнатите максимални температури в края на процеса (Фиг. 3-3(б)) в биореакторите от първото стъпало в зависимост от стойностите на температурата и обема на заредената сурова утайка.

¹ Всички данни за обекта на изследване са предоставени от университета в Лимерик, Ирландия, за което изказвам своята благодарност.



Фигура 3-3. Дълбочина на термичния шок (3-3(а)) и достигнати максимални температури в края на процеса (3-3(б)) в биореакторите от първото стъпало в зависимост от температурата и обема на заредената сурова утайка.

За да се преодолее термичният шок, е необходимо да се ограничи въздействието на несигурните входни параметри.

Таблица 3-1. Параметри на потоците захранващи със сурова утайка биореакторите от първото стъпало 1А (1В).

Параметри на потоците	Граници на изменение		Плътност на утайката ρ [kg/m ³]	Специфична топлоемкост на утайката c_p [kJ/(kg. ⁰ C)]
	Минимална	Максимална		
Обем на заредена сурова утайка [m ³]	12	20	1025	4
Съдържание на твърдите вещества [%]	5,2	6,5		
Съдържание на летливите твърди вещества [%]	3,7	5,2		
Температура на суровата утайка [°C]	5,6	20,2		
Времетраене на зареждане [s]	900	2640		

Таблица 3-2. Параметри на потоците захранващи с частично обработена утайка биореакторите от второто стъпало 2А (2В).

Параметри на потоците	Граници на изменение		Плътност на утайката ρ [kg/m ³]	Специфична топлоемкост на утайката c_p [kJ/(kg. ⁰ C)]
	Минимална	Максимална		
Обем на заредена частично обработена утайка [m ³]	12	20	1025	4
Съдържание на летливите твърди вещества [%]	1,767	3,355		
Температура на частично обработената утайка [°C]	42,5	62,0		
Времетраене на зареждане [s]	900	1320		

Таблица 3-3. Параметри на продуктите потоци източвани от второто стъпало 2А (2В).

Параметри на продуктите потоците	Граници на изменение		Плътност на утайката ρ [kg/m ³]	Специфична топлемост на утайката c_p [kJ/(kg.°C)]
	Минимална	Максимална		
Обем на източната обработена утайка [m ³]	12	20	1025	4
Съдържание на летливите твърди вещества [%]	1,706	2,769		
Температура на обработената утайка [°C]	54,5	68,1		
Времетраене на зареждане [s]	900	1320		

3.2. Интеграционна рамка

Установено е, че съществени количества топлина се губят в околната среда чрез продукта, заустван в продуктивния резервоар. При определени условия, тази топлина може да се използва за подгриване на свежите утайки, подавани от зареждащия резервоар към първия реактор. Оползотворяването на тази топлина обаче е възпрепятствано от следните фактори:

- операциите на източване и зареждане на съответните биореактори са дискретни, и са изместени един спрямо друг във времето, т.е. потоците кандидати за топлинна интеграция се появяват периодично и се разминават във времето;
- процесът на интеграцията допълнително е усложнен от наличието на стохастични колебания в стойностите на параметрите на потоците, кандидати за участие в топлинната интеграция.

Предложената обща рамка за топлинна интеграция на потоците се прилага към АТАД системата, състояща се от един резервоар за съхранение на „топлина” или „студ”, които се оползотворяват, в подходящия момент, при появата на съответните потоци нуждаещи се от нагриване или охлаждане. Преносът на топлината се осъществява с помощта на два топлообменника за нагриване и охлаждане на съответните студени/горещи потоци, а транспортирането на съответните флуиди през топлообменниците се осъществява посредством помпи.

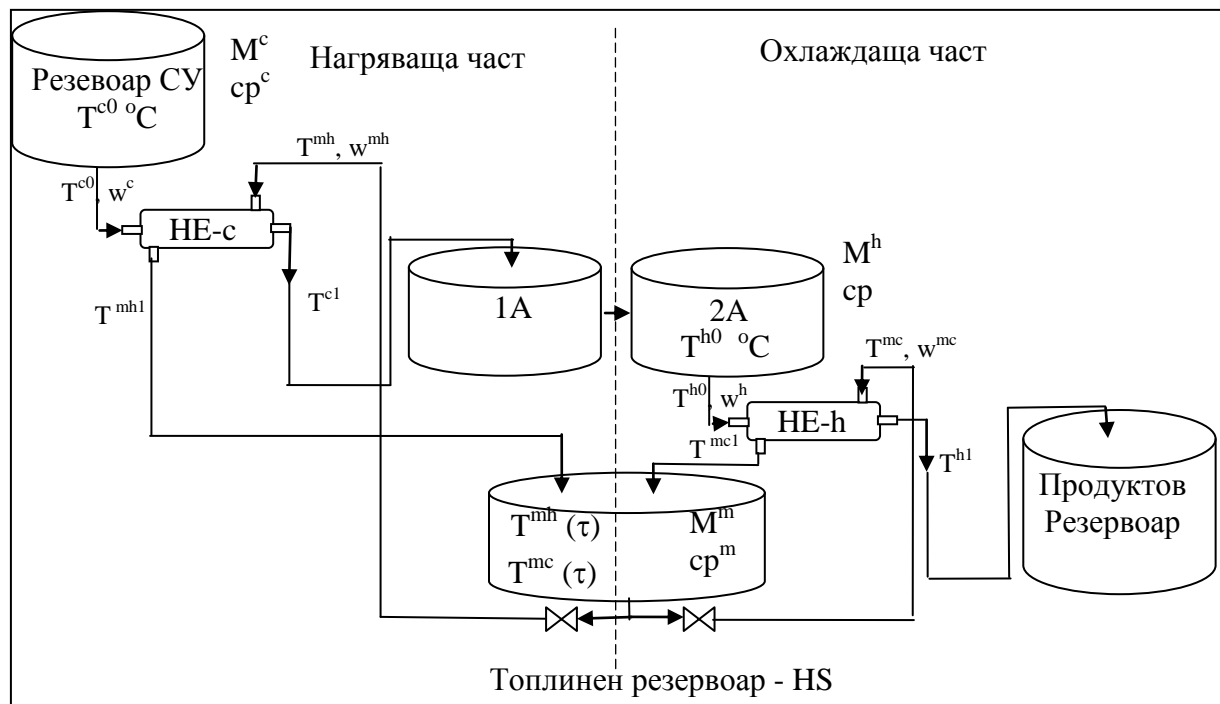
Предложената обща рамка може да се справи с посочените по-горе трудности. В нея е отчетен фактът, че двете серии на АТАД системата се зареждат независимо една от друга. Схемата е подходяща за включване в стохастична оптимизационна рамка защото:

- несигурните параметри на интегрираните потоци са независими един от друг, тъй като температурите на горещите потоци на изхода от втория биореактор са продукт от предходни зареждания на системата и нямат пряка връзка с температурата на потоците сурова утайка, подлежащи на нагриване.

- интеграционните процеси се осъществяват при спрени биореактори, което позволява при математическото ѝ моделиране системата да се разглежда като отворена (т.е. процесите в реакторите не се обсъждат).

3.3. Математично описание на процеса на енергийна интеграция на потоците в ATAD система

Схемата за оползотворяване на топлината в периодичната ATAD е показана на фигура 3-5. На нея са отбелязани параметрите на потоците, подлежащи на интеграция. Условно (с пунктир) тя е разделена на две части – нагряваща и охлаждаща.



Фигура 3-5 Схема за оползотворяване на топлината в периодична ATAD система с използване на един топлинен резервоар

Флуидът, съхраняван в топлинния резервоар - *HS*, се използва като топло или хладо-агент в различните времеви периоди. Започвайки от нагряващата част, схемата работи както следва. Агентът, съхраняван като „горещ“ в топлинния резервоар (условно наречен „горещ“ агент), с начална температура T^{mh0} минава през топлообменника *HE-c* за период от време τ^c , отдава топлината си на студената утайка (флуид), охлажда се и се връща отново в топлинния резервоар, където се смесва с намиращия се там агент. В края на процеса на нагряване агентът в *HS* е охладен и неговата температура е T^{mc0} . По време на процеса на охлаждане „студеният“, вече агент, с начална температура T^{mc0} , се използва за охлаждането на горещия флуид изходящ от биореактор *2A*. Той минава през топлообменник- *HE-h* за период от време τ^h , охлажда горещия поток и се връща подгрят в топлинния резервоар. В края на процеса на охлаждане температурата в *HS* е T^{mh0} топлинният резервоар сменя функциите си в различните времеви периоди.

Целта на математичното описание е да се определят температурите в края на процесите на нагриване и охлаждане на изходите от топлообменниците, както и началните температури T^{mh0} и T^{mc0} в топлинния резервоар HS . Подходът за неговото създаване е следният:

- Най-напред отделно се създават математични описания на топлообмена в нагриващата и охлаждащата част на предложената схема;
- След което двете описания се обединяват в едно, чрез решаване на модела на топлинния резервоар.

3.3.2. Математично описание на топлообмена в нагриващата част.

В резултат на направените математични преобразувания се получават следните аналитични решения:

За температурите на изходите на топлообменник HE-с в края на процеса при $\tau = \tau^c$:

$$T^{c1}(\tau^c) = T^{c0} + [T^{mh}(\tau^c) - T^{c0}] R^c \Phi e^c, \quad (3-6)$$

$$T^{mh1}(\tau^c) = T^{mh}(\tau^c) - [T^{mh}(\tau^c) - T^{c0}] \Phi e^c, \quad (3-7)$$

където:

$$R^c = \frac{w^{mh} cp^m}{w^c cp^c}; \quad w^c = \frac{M^c}{\tau^c} [kg/s]; \quad \Phi e^c = \frac{1 - \exp(-y^c U^c A^c)}{1 - R^c \exp(-y^c U^c A^c)}; \quad \text{и } y^c = \frac{1}{w^{mh} cp^m} - \frac{1}{w^c cp^c}.$$

Температурата на флуида в топлинния резервоар:

При начално условие $T^{mh}(0) = T^{mh0}$, където T^{mh0} е температурата на „горещия“ агент в топлинния резервоар в края на процеса е:

$$T^{mh}(\tau^c) = T^{c0} + (T^{mh0} - T^{c0}) \exp(-G^{mh} \Phi e^c \tau^c) \quad (3-8)$$

Тази температура определя началната температура, при която топлинният резервоар започва да работи като „студен“:

$$T^{mc0} = T^{mh}(\tau^c). \quad (3-9)$$

3.3.3. Математично описание на топлообмена в охлаждащата част.

Аналогично на горното се получава и математичното описание за охлаждащата част. В края на процеса охлаждане, при $\tau = \tau^h$, температурите на изходите на топлообменник HE-h са:

$$T^{h1}(\tau^h) = T^{h0} - (T^{h0} - T^{mc}(\tau^h)) \Phi e^h, \quad (3-15)$$

$$T^{mc1}(\tau^h) = T^{mc}(\tau^h) + (T^{h0} - T^{mc}(\tau^h)) R^h \Phi e^h, \quad (3-16)$$

където:

$$R^h = \frac{w^h c p^h}{w^{mc} c p^m}; \quad w^h = \frac{M^h}{\tau^h} [kg/s]; \quad \Phi e^h = \frac{1 - \exp(-y^h U^h A^h)}{1 - R^h \exp(-y^h U^h A^h)}; \quad y^h = \frac{1}{w^h c p^h} - \frac{1}{w^{mc} c p^m}$$

Температурата на флуида в топлинния резервоар е:

$$T^{mc}(\tau^h) = T^{h0} + (T^{mc0} - T^{h0}) \exp(-R^h \Phi e^h G^{mc} \tau^h). \quad (3-17)$$

Тази температура е равна на началната температура, при която топлинният резервоар започва да работи като „горещ“:

$$T^{mh0} = T^{mc}(\tau^h) \quad (3-18)$$

3.3.4. Обединение на двата модела.

Общото звено за нагряващата и охлаждаща част на предложената схема е топлинният резервоар. Уравнения (3-9) и (3-18) представят достигнатите температури, при които HS обръща функцията си. Началните температури в HS са:

$$T^{mh0} = \frac{b^{22} + b^{12} b^{21}}{1 - b^{11} b^{21}}; \quad T^{mc0} = \frac{b^{12} - b^{11} b^{22}}{1 - b^{11} b^{21}} \quad (3-19)$$

където:

$$b^{11} = \exp(-G^{mh} \Phi e^c \tau^c); \quad b^{12} = [1 - \exp(-G^{mh} \Phi e^c \tau^c)] T^{c0}$$

$$b^{21} = \exp(-R^h \Phi e^h G^{mc} \tau^h); \quad b^{22} = [1 - \exp(-R^h \Phi e^h G^{mc} \tau^h)] T^{h0}.$$

3.4. Анализ на ефективността на енергийната интеграция на границите на стохастичното пространство

Границите на стохастичното пространство определят пространството на вариация на несигурните данни, несигурностите, оказващи най-съществено въздействие върху устойчивостта на процеса и тяхното вариране, са:

Обемите на ежедневно зарежданите/обработвани утайки	12 – 20 [m ³]
Температурите на заредените утайки	5,6 – 20,2 °C
Температурите на изходящите обработени утайки	54,5– 68,1 °C

За да се определи температурният диапазон, в който може да варират температурите на подгрятата сурова утайка в края на интеграционния процес, е необходимо математичното описание на предложената интеграционна рамка да бъде включено в рамките на детерминистичен оптимизационен проблем, който да бъде

решен за всеки сценариен връх, при критерий за оптималност максимум на температурата на нагрятата утайка, изходяща от топлообменник *HE-c*.

3.4.2. Независими променливи

При зададени стойности за A^c, A^h и M^m ефективността на топлообменния процес зависи единствено от времената, за които протичат процесите на нагриване и охлаждане в съответните топлообменници. За управление на топлообменния процес, в оптимизационната задача, се въвеждат следните непрекъснати независими променливи:

τ^c - времето, за което студения флуид се нагрива в *HE-c* [s];

τ^h - времето, за което горещия флуид се охлажда в *HE-h* [s],

които се променят в технически определени граници както следва:

$$\tau^{c\min} \leq \tau^c \leq \tau^{c\max}, \quad (3-20)$$

$$\tau^{h\min} \leq \tau^h \leq \tau^{h\max}. \quad (3-21)$$

3.4.3. Математичен модел

Математичният модел включва уравнения (3-6), (3-7), (3-8) (3-15), (3-16) и (3-17), определящи температурите на входовете и изходите на съответните топлообменници в края на енергийната интеграция на потоците в АТАД система, както и уравнения (3-19), определящи началните температури в топлинен резервоар, от които той започва да изпълнява функциите съответно на горещ и студен. Моделът трябва да бъде допълнен и с ограничения, следящи за физическата реализуемост на топлообмена в топлообменниците:

$$\Delta T^c \geq \Delta T^{\min} \quad (3-22)$$

$$\Delta T^h \geq \Delta T^{\min}, \quad (3-23)$$

където ΔT^c и ΔT^h са минималните температурни разлики в края на топлообменния процес съответно за топлообменници *HE-c* и *HE-h*.

$$\Delta T^c = \min \left\{ \left(T^{mh1}(\tau^c) - T^{c0} \right), \left(T^{mh}(\tau^c) - T^{c1}(\tau^c) \right) \right\}, \quad (3-24)$$

$$\Delta T^h = \min \left\{ \left(T^{h0} - T^{mc1}(\tau^h) \right), \left(T^{h1}(\tau^h) - T^{mc}(\tau^h) \right) \right\}. \quad (3-25)$$

3.4.4. Оптимизационен критерий

Обект на оптимизация е достигнатата, в края на интеграционния процес, температура на утайката, изходяща от топлообменник *HE-c*. Търси се нейният максимум:

$$\underset{\tau^c, \tau^h}{MAX} \left(T^{c1}(\tau^c) \right). \quad (3-26)$$

3.4.5. Резултати от анализа

Проведен е анализ за ефективността на интеграционната схема. Резултатите от решението на съответния оптимизационен проблем за всеки от сценарийните върхове на хипер-правоъгълника, определят максималните температури на нагрятата утайка, изходяща от топлообменник *HE-c*.

Таблица 3-8. Максимални достигнати температури на суровата утайка на границите на несигурното пространство

Върхове на хипер-правоъгълника	T^{c1} [°C]	Върхове на хипер-правоъгълника	T^{c1} [°C]
1	19,2	5	18,7
2	25,6	6	24,9
3	26,9	7	26,7
4	33,4	8	32,9

За да работи ефективно предложената схема за топлинна интеграция за ATAD системата, температурата на подгрятата сурова утайка, постъпваща в първия биореактор, не трябва да бъде по-ниска от 18 [°C]. Тази температура определя долната граница на ефективността на интеграционната рамка, която трябва да влезе като ограничение в стохастичния оптимизационен проблем – условно наречено “ограничение за ефективност на интеграцията”.

3.5. Изводи

От представените изследвания в тази глава могат да бъдат направени следните изводи:

1. Дадено е описание на обекта на изследване - индустриална конвенционална ATAD система за пречистване на битови отпадъчни води. Направен е статистически анализ на наличната извадка със стойностите на основните параметри на потоците и е показано, че те са нормално разпределени величини. Показано е, че неустойчивите работни температури в биореакторите зависят от много стохастични фактори, чието въздействие може да бъде преодоляно чрез подходяща енергийна интеграция на периодичните потоци в условията на несигурност, а задачата за проектирането или реконструкцията на ATAD системата трябва да се разглежда като проблем на стохастичното програмиране.

2. Предложена е обща рамка за топлинна интеграция на потоците в ATAD системата, която е подходяща за включване в стохастична оптимизационна рамка, която се състои от един топлинен резервоар, два топлообменника за нагриване и охлаждане на съответните студени/горещи потоци и помпи за транспортирането им през топлообменниците.

3. За предложената интеграционна рамка е изведено аналитично математично описание, посредством което при известни стойности на температурите на суровата утайка в захранващия резервоар и на пастьоризираната утайка във втория биореактор,

и при зададени стойности за топлообменните повърхности, продължителността на процесите на нагриване и охлаждане и масата на топло/хладо-агента в топлинния резервоар, температурите на изходящите от двата топлообменника потоци се определят еднозначно.

4. Направен е анализ на ефективността на енергийната интеграция на границите на стохастичното пространство и е определен температурният диапазон, в който може да варират температурите на подгрявата сурова утайка в края на интеграционния процес. За целта, математичното описание на предложената интеграционна рамка е включено в рамките на детерминистичен оптимизационен проблем, който е решен за всеки сценариен връх при критерий за оптималност максимум на температура на нагрявата сурова утайка. Определена е долната граница на ефективност на интеграционната рамка, която трябва да влезе като ограничение в стохастичния оптимизационен проблем.

4. Системно-ориентиран подход за оптимална реконструкция на енергийно интегрирана ATAD система за редуциране на въздействията на стохастичните параметри

Създаването на обща рамка за енергийна интеграция на потоците в ATAD система и на съответното математично описание на интеграционния процес, сами по себе си не решават проблема за справяне с въздействието на стохастичните параметри. Математичното описание трябва да бъде включено в рамките на подходящо дефиниран стохастичен оптимизационен проблем, за да се определят тези стойности на променливите на интеграционната схема, които ще оберат въздействието на стохастичните параметри в максимално широки граници и по този начин ще осигурят значително по-устойчиви работни условия на цялата ATAD система.

Вземането на решение в условията на несигурна информация е изключително сложен процес. За целта основните проблеми, които трябва да бъдат решени са свързани с:

1. Дискретизацията на несигурното пространство.
2. Разделянето на променливите на такива за първия и втория стадий и дефинирането на задачата в термините на многосценарийното двустадийно стохастично програмиране
3. Създаване/намиране на подходящи методи и средства за нейното решаване.
4. Вземане на решение за избор на най-подходящото решение посредством определянето на индекса на гъвкавост.

4.1. Дискретизация на несигурното пространство

Дискретизацията на пространството на стохастичните параметри се използва, за да се трансформира задачата на двустадийното стохастично програмиране в еквивалентен детерминистичен оптимизационен проблем. Дискретизацията намалява размера на първоначалния проблем и води до формулиране на оптимизационната задача не върху цялото стохастично пространство, а върху негово представително множество от сценарии, за което е доказано, че добре го апроксимират. Всеки сценарий представя възможна стохастична ситуация.

4.1.1. Евристичен метод за редуциране на броя на сценариите при двустадийното стохастично програмиране, метод на Karupiah et al., (2010)

За да редуцира размера на оригиналното множество от сценарии и да се получи ново представително множество от сценарии, **Karupiah et al., (2010)** използват следната евристика – *сумата от вероятностите на новите сценарии, в които се появява стойността на несигурния параметър - $\theta_i^{j_i}$ трябва да е равна на $p_i^{j_i}$* . Чрез прилагането на тази евристика, вероятностите на сценариите се преразпределят, така

че сумарната вероятност от настъпване на определени стойности за даден несигурен параметър в различните сценарии да съответства на вероятността за появяване на съответната стойност за несигурния параметър в оригиналното множество. Тази евристика трябва да се спазва за всички стойности на всеки от несигурните параметри. Освен това, сумата от вероятностите на редуцирания набор от сценарии трябва да е равна на 1.

4.1.2. Необходими данни за формулиране на стохастичната оптимизационна задача за ATAD системата

Множеството от стохастичните параметри, необходимо за формулиране на оптимизационния проблем, е определено от избраното множество от сценарии S , $s = 1, 2, \dots, S$. За всеки сценарий s , $s \in S$ то включва:

V_s - обемът на заредената сурова/зауствена обработена утайка [m^3];

T_s^{c0} - температурата на постъпващата за зареждане студена сурова утайка [$^{\circ}\text{C}$];

T_s^{h0} - температура на източваната стабилизирана гореща утайка [$^{\circ}\text{C}$];

p_s - вероятността за възникване на дадения сценарий.

Всички останали данни, необходими за формулирането на стохастичната оптимизационна задача за ATAD системата са детерминирани и включват:

cp^c - специфичен топлинен капацитет на студената утайка [$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$];

cp^h - специфичен топлинен капацитет на горещата утайка [$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$];

cp^m - специфичен топлинен капацитет на междинния топло/хладо агент в топлинния резервоар [$\text{J}/(\text{kg } ^{\circ}\text{C})$];

U^c - коефициент на топлопренасяне в топлообменник $HE-c$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})$];

U^h - коефициент на топлопренасяне в топлообменник $HE-h$ [$\text{W}/(\text{m}^2 \text{ } ^{\circ}\text{C})$];

ΔT^{min} - минимална допустима температурна разлика за потоците в края на топлообменниците [$^{\circ}\text{C}$];

ρ - плътност на заредената/източена студена сурова/гореща обработена утайка [kg/m^3];

ρ^m - плътност на междинния топло/хладо агент в резервоара за съхранение на топлина [kg/m^3].

4.2. Двустадийно мултисценарийно стохастично програмиране за редуциране на въздействията на несигурните параметри в АТАД системата

4.2.1. Независими променливи

Променливите се разделят на две множества – *променливи*, отнасящи се за *първия стадий* и съответно, *променливи* отнасящи се за *втория стадий*.

Целта на първия стадий е да се избере оптимален вектор за дизайн променливите, а на втория – да се определят оптималните вектори за променливите на състоянията при фиксирани дизайн променливи.

Така, избраните *независими променливи за първия стадий* са:

A^c - топлообменната повърхност за топлообменник *HE-c* [m^2];

A^h - топлообменната повърхност за топлообменник *HE-h* [m^2];

V^m - работният обем на топлинния резервоар [m^3].

Решенията на втория стадий трябва да гарантират осъществимостта на интеграцията, чрез определянето на подходящите времена за транспортиране на флуидите. Следователно, за *независими променливи за втория стадий* са определени времената:

τ_s^c - за нагряване на флуидите в топлообменник *HE-c* [s] и

τ_s^h - за охлаждане на флуидите в топлообменник *HE-h* [s] за всеки един сценарий

$-s, \forall s, s \in S$.

Посредством тях се определят скоростите на транспортиране на флуидите за всеки сценарий – s , осъществява се избора на необходимите помпи и се определят разходите за електрическа енергия за обслужване на системата.

Независимите променливи, както за първия, така и за втория стадий са непрекъснати величини с граници:

$$A_{\min}^c \leq A^c \leq A_{\max}^c, \quad (4-10) \quad \tau_{\min}^c \leq \tau_s^c \leq \tau_{\max}^c, \quad \text{за } \forall s, s \in S, \quad (4-13)$$

$$A_{\min}^h \leq A^h \leq A_{\max}^h, \quad (4-11) \quad \tau_{\min}^h \leq \tau_s^h \leq \tau_{\max}^h, \quad \text{за } \forall s, s \in S \quad (4-14)$$

$$V_{\min}^m \leq V^m \leq V_{\max}^m, \quad (4-12).$$

Границите на променливите за първия стадий трябва да определят тези региони на изменение на характеристиките на основното оборудване (топлообменни повърхности и работен обем на топлинния резервоар), които се влияят от изменението на стохастичните параметри. Оптимизационният критерий е минимизиране на необходимите капиталови разходи за основното оборудване.

Общият брой на променливите в стохастичния оптимизационен проблем е равен на сумата от променливите за първия стадий плюс броя на променливите за втория стадий умножени по броя на сценариите.

4.2.2. Математична формулировка на задачата за проектиране на енергийно интегрираната АТАД система в условията на несигурност.

4.2.2.1. Математичен модел на енергийната интеграция

Математичният модел на топлинно-интегрирана АТАД система (уравнения (3-6)-(3-8), (3-15)-(3-17) и (3-19)) трябва да бъде преформулиран в термините на двустадийното стохастично програмиране. Той трябва да е осъществим за всеки сценарий- s , $s \in S$. Следователно, всички температури в интеграционната схема е необходимо да бъдат определени като функции на променливите на първия и втория стадий, т.е като функции на $\{A^c, A^h, M^m, \tau_s^c, \tau_s^h\}$, където $M^m = V^m \cdot \rho^m$ [kg].

Математично описание на топлообмена в нагриващата част.

За температурите на изходите на топлообменник HE-с в края на процеса:

$$T^{c1}(\tau_s^c) = T_s^{c0} + [T^{mh}(\tau_s^c) - T_s^{c0}] \cdot R_s^c \cdot \Phi e_s^c, \quad \forall s, s \in S \quad (4-15)$$

$$T^{mh1}(\tau_s^c) = T^{mh}(\tau_s^c) - (T^{mh}(\tau_s^c) - T_s^{c0}) \Phi e_s^c, \quad \forall s, s \in S \quad (4-17)$$

Температурата на флуида в топлинния резервоар

Температурата T^{mh} на горещия междинен флуид, постъпващ в топлообменник HE-с, от топлинния резервоар в края на процеса τ_s^c е :

$$T^{mh}(\tau_s^c) = T_s^{c0} + (T_s^{mh0} - T_s^{c0}) \exp(-G_s^{mh} \cdot \Phi e_s^c \cdot \tau_s^c) \quad , \quad \forall s, s \in S \quad (4-16)$$

където; $G_s^{mh} = \frac{W_s^{mh}}{M^m} [s^{-1}]$.

Тази температура определя началната температура, при която топлинният резервоар започва да работи като „студен“.

Математическо описание на топлообмена в охлаждащата част.

Аналогично на горното се получава и математичното описание за охлаждащата част. В края на процеса охлаждане, температурите на изходите на топлообменник HE-h са:

$$T^{h1}(\tau_s^h) = T_s^{h0} - (T_s^{h0} - T^{ms}(\tau_s^h)) \Phi e_s^h, \quad \forall s, s \in S. \quad (4-18)$$

$$T^{mc1}(\tau_s^h) = T_s^{mc}(\tau_s^h) + (T_s^{h0} - T^{mc}(\tau_s^h)) R_s^h \cdot \Phi e_s^h, \quad \forall s, s \in S. \quad (4-20)$$

Температурата на флуида в топлинния резервоар е:

$$T^{mc}(\tau_s^h) = T_s^{h0} + (T_s^{mc0} - T_s^{h0}) \exp(-R_s^h \cdot \Phi e_s^h \cdot G_s^{mc} \cdot \tau_s^h), \quad \forall s, s \in S \quad (4-19)$$

където:

$$R_s^h = \frac{w_s^h \cdot cp^h}{w_s^{mc} \cdot cp^m}, \quad w_s^h = \frac{M_s}{\tau_s^h}, \quad [kg/s], \quad w_s^{mc} = \frac{M^m}{\tau_s^h} [kg/s], \quad \Phi e_s^h = \frac{1 - \exp(-y_s^h \cdot U^h \cdot A^h)}{1 - R_s^h \cdot \exp(-y_s^h \cdot U^h \cdot A^h)}$$

$$y_s^h = \frac{1}{w_s^h \cdot cp^h} - \frac{1}{w_s^{mc} \cdot cp^m} \quad \text{и} \quad G_s^{mc} = \frac{w_s^{mc}}{M^m} [s^{-1}]. \quad \text{използвани в (4-15), (4-16), (4-18), (4-19), (4-20).}$$

Обединение на двата модела.

Началните "гореща" и "студена" температури T_s^{mh0} и T_s^{mc0} в уравнения (4-16) и (4-19) на загряващия/ охлаждащ междинен флуид в топлинния резервоар за сценарий s се определят от:

$$T_s^{mh0} = \frac{b_s^{22} + b_s^{12} b_s^{21}}{1 - b_s^{11} b_s^{21}}; \quad T_s^{mc0} = \frac{b_s^{12} - b_s^{11} b_s^{22}}{1 - b_s^{11} b_s^{21}}, \quad \forall s, s \in S, \quad (4-21)$$

където:

$$b_s^{11} = \exp(-G_s^{mh} \Phi e_s^c \tau_s^c); \quad b_s^{12} = [1 - \exp(-G_s^{mh} \Phi e_s^c \tau_s^c)] T_s^{c0},$$

$$b_s^{21} = \exp(-R_s^h \Phi e_s^h G_s^{mc} \tau_s^h); \quad b_s^{22} = [1 - \exp(-R_s^h \Phi e_s^h G_s^{mc} \tau_s^h)] T_s^{h0}.$$

4.2.2.2. Ограничения

Моделът (4-15)–(4-21) трябва да бъде допълнен с ограничения, следящи за физическата осъществимост на топлообмена в топлообменниците, за ефективността на топлинната интеграция, както и за стойностите на началните „горещи“/”студени” температури в топлинния резервоар.

За целта се определят минималните температурни разлики ΔT_s^c и ΔT_s^h в края на топлообменници $HE-c$ и $HE-h$ за сценарий s :

$$\Delta T_s^c = \min \left\{ \left(T_s^{mh1}(\tau_s^c) - T_s^{c0} \right), \left(T_s^{mh}(\tau_s^c) - T_s^{c1}(\tau_s^c) \right) \right\} \quad \forall s, s \in S, \quad (4-22)$$

$$\Delta T_s^h = \min \left\{ \left(T_s^{h0} - T_s^{mc1}(\tau_s^h) \right), \left(T_s^{h1}(\tau_s^h) - T_s^{mc}(\tau_s^h) \right) \right\}, \quad \forall s, s \in S. \quad (4-23)$$

Така определените ΔT_s^c и ΔT_s^h трябва да са по-големи или равни на минималната допустима температурна разлика за потоците в края на топлообменниците ΔT^{\min} :

$$\Delta T_s^c \geq \Delta T^{\min}, \quad \forall s, s \in S \quad (4-24)$$

$$\Delta T_s^h \geq \Delta T^{\min}, \quad \forall s, s \in S \quad (4-25)$$

За да работи ефективно предложената схема за топлинна интеграция за АТАД системата, за всеки сценарий s , температурата на подгрятата сурова утайка,

постъпваща в първия биореактор трябва да бъде по-висока или равна на температурата - T^{ef} (уравнение 3-27), определяща долната граница за ефективност на интеграцията:

$$T_s^{c1} \geq T^{ef}, \quad \forall s, s \in S. \quad (4-26)$$

Следващите температурни ограничения се отнасят до междинния агент. Целта им е да не допуснат началните „студена“ и „гореща“ температури в топлинния резервоар да се кръстосат и да гарантират достатъчни температурни нива в топлинния резервоар в края на процесите нагряване/охлаждане, така че следващите процеси на нагряване и охлаждане да бъдат възможни:

$$T_s^{mh0} \geq T_s^{c0}, \quad \forall s, s \in S, \quad (4-27)$$

$$T_s^{mc0} \leq T_s^{h0}, \quad \forall s, s \in S, \quad (4-28)$$

$$T_s^{mh0} \geq T_s^{mc0}, \quad \forall s, s \in S. \quad (4-29)$$

4.2.2.3. Целева функция

Целевата функция включва очакваните годишни капиталови и експлоатационни разходи. Капиталовите разходи се определят от разходите за основното оборудване - топлообменници и резервоар за съхранение на топлина. Техните размери зависят от стойностите на променливите на първия стадий. Експлоатационните разходи, се определят от годишно потребената електрическа енергия за транспортиране на флуидите при реализацията на всеки един сценарий. Те също зависят от стойностите на променливите за първия и втори стадий.

Разходите за топлообменниците и топлинния резервоар се изчисляват както следва:

$$C(A^c) = \alpha_{HE} \cdot (A^c)^{0.62}, \quad C(A^h) = \alpha_{HE} \cdot (A^h)^{0.62}, \quad C(V^m) = \alpha_{HS} \cdot (V^m)^{0.68} \text{ [CU]}, \quad (4-30)$$

където α_{HE} и α_{HS} са съответните ценови корелационните коефициенти, съгласно Douglas (1988).

Разходите за помпите се оценяват както следва:

$$C(PC_{s^*}) = \alpha_{PS} \cdot (PC_{s^*})^{0.304},$$

$$C(PH_{s^{**}}) = \alpha_{PS} \cdot (PH_{s^{**}})^{0.304},$$

$$C(PM_{s^{***}}) = \alpha_{PR} \cdot (PM_{s^{***}})^{0.67} \text{ [CU]}, \quad s^*, s^{**}, s^{***} \in S \quad (4-34)$$

където α_{PS} и α_{PR} са съответните ценови корелационните коефициенти за помпите за утайки и обикновенната помпа, Douglas (1988).

Дневната консумация на електрическа енергия от помпите за обслужване на сценарий- s се изчислява, както следва:

$$E_s^c = P_{s_s^c} \cdot 3.6 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}], \quad \forall s, s \in S \quad (4-39)$$

$$E_s^h = P_{s_s^h} \cdot 3.6 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}], \quad \forall s, s \in S \quad (4-40)$$

$$E_s^m = P_{s_s^{cm}} \cdot 3.6 \cdot 10^{-3} + P_{s_s^{hm}} \cdot 3.6 \cdot 10^{-3} \quad [\text{kWh}], \quad \forall s, s \in S \quad (4-41)$$

При цена на енергията EC [CU/ kWh], консумираната енергия за една година зависи от броя на дните, в които се обслужва някой сценарий $-s$, т.е. от вероятността за неговото възникване:

$$EN_s = p_s \cdot D \cdot (E_s^c + E_s^h + E_s^m) EC \quad [\text{kWh}], \quad \forall s, s \in S \quad (4-42)$$

където D е броят на дните в годината, в които АТАД системата е работила.

При срок за откупуване $- \gamma$ на основното и спомагателно оборудване, годишната цена за реконструкция и експлоатация на енергийно интегрирана конвекционална АТАД система се изчислява като следва:

$$ATADCost = \frac{1}{\gamma} \{C(A^c) + C(A^h) + C(V^m) + C(PC_{s^*}) + C(PH_{s^{**}}) + C(PM_{s^{***}})\} + \sum_{s=1}^S EN_s \quad [\text{CU}]. \quad (4-43)$$

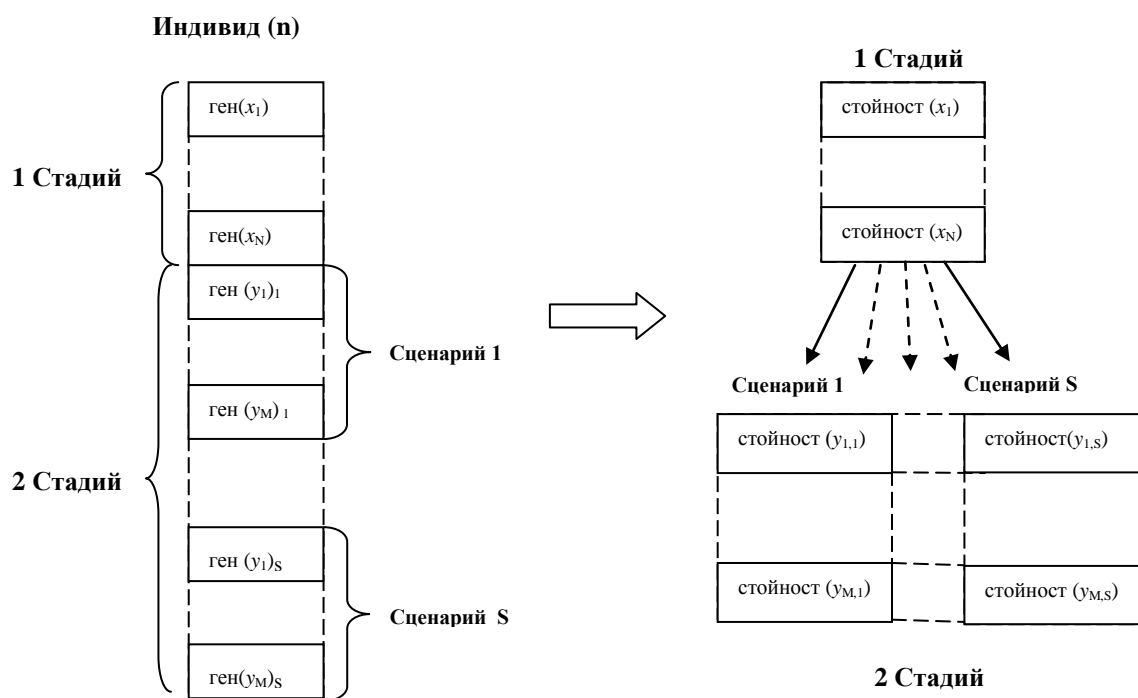
Тя е обект на минимизация:

$$\underset{A^c, A^h, V^m, r_s^c, r_s^h, \forall s, s \in S}{MIN} \quad ATADCost. \quad (4-44)$$

4.3. BASIC генетичен алгоритъм - средство за решаване на двустадийната задача на стохастичното програмиране

Оптимизационният проблем (4-10)-(4-44) е формулиран в термините на двустадийно нелинейно стохастично програмиране. За неговото решаване се използва BASIC генетичен алгоритъм, създаден в Института по инженерна химия, Shopova and Vakiieva (2006). BASIC GA следва всички общи стъпки на генетичните алгоритми. Първоначално стохастично се избират индивиди (вектори на управляващите променливи - решенията) от пространството на търсене, за да се създаде популация (множество от решения) на родителските индивиди, които са представени чрез техния генотип (кодирани стойности на променливите). Родителската популацията "еволюира" към по-добри индивиди чрез прилагане на генетичните оператори - селекция, рекомбинация и мутация. Селекцията се осъществява с определена вероятност въз основа на стойностите на т.н. „фитнес“ функция на родителските индивиди, като за нейното изчисляване се използва техния фенотип (реални стойности на променливите). Тя по същество представлява нормализирана целева функция имаща за цел определяне на тези индивиди, които ще участват в репродукцията. След това се прилага операторът на рекомбинация (кръстосването) пак с определена вероятност, при което родителските индивиди обменят своите гени (кодирани променливи) по между си и така се създават индивидите на поколението (нови решения). След това с определена вероятност се прилага мутацията като се използва генотипа на поколението. При нея се създават нови решения чрез промяна на определен ген от

даден индивид на поколенията. Накрая, всички родители и деца се събират в общо множество, от което се избира „най-добрият“ индивид, който се запазва в следващата генерация. Последната се допълва в индивиди, взети по случаен начин от множеството на родителите и децата, така че да достигне размера на първоначалната популация, която замества. BASIC GA използва броя на генерациите като критерий за спиране на търсенето. Той проверява за изпълнението на стоп критерий. Ако е изпълнен, полученото най-добро решение се предлага като решение на проблема. В обратния случай, цикъла се затваря чрез изчисляване на фитнес функции за новата популация. BASIC GA се прилага с цел решаване на разглеждания оптимизационен проблем. Това, че включва схеми на кодиране на променливите в непрекъснатото пространство на търсене позволява създаването на индивид (кодиран вектор на независими променливи), в съответствие с разделените в две групи променливи, отнасящи се до първия и втория етап на стохастично оптимизационния проблем. Тъй като решението за първия етап променливи е взето преди реализацията на несигурността, те са общи за всички сценарии. Това позволява на първата част от хромозомата да представя променливи, свързани с първия етап, където броят на гените е равен на броя на променливите от първия етап. Втората част от хромозомата е разделена на S сегменти, всеки от тях се отнася до сценарий s . Броят на гените във всеки сегмент е равен на броя на променливите, свързани с втория стохастичен етап. По този начин, всеки индивид ще осигури конкретно решение на проблема, както е показано на фиг. 4-1.



Фигура 4-1. Структура на индивида и съответното решение.

BASIC GA започва със случайно генерирана популация от N индивида следвайки гореописаните стъпки, докато се получи решение на проблема.

Чрез генериране на сценарии и използвайки BASIC GA се определя целевата функция, оперативните разходи за отделните сценарии, както и променливите от първия и втория стадий.

4.4. Резултати от оптимизацията

4.4.1. Използвани данни

Стохастичните параметри, оказващи въздействие на топлинната интеграция на ATAD системата са обемите на ежедневно зарежданите/източвани обработени утайки, които са равни - $V^c = V^h = V$, температурите на заредените утайки - T^{c0} и температурите на изходящите обработени утайки - T^{h0} . Всяка една комбинация от стохастичните параметри дефинира точно определен сценарий - $s = \{V_s, T_s^{c0}, T_s^{h0}\}$. За да се избегне това неудобство, от целия набор от данни са използвани редуцирани извадки по отношение на съответни стойности на стохастичните параметри $\{V\}$, $\{T^{c0}\}$, и $\{T^{h0}\}$ и са определени вероятностите за тяхното появяване. Първата група от три извадки включва по три стойности за параметрите $\{V\}$, $\{T^{c0}\}$, и $\{T^{h0}\}$, а втората група – съответно по седем стойности.

С помощта на така получените данни, оптимизационният проблем е формулиран и решен многократно. За първата група от данни са получени 14 различни множества от сценарии S1 – S14, където всяко от тях включва между 18 и 25 сценария. За втората група е получено едно решение S15 съдържащо 238 сценария. За илюстрация в Таблица 4-1 е представено само едно от получените решения, множеството от сценарии – S1 включващо 18 сценария.

Таблица 4-1. Множество от сценарии S1 съдържащо 18 сценария.

s	1	2	3	4	5	6	7	8	9
V_s	14	14	14	14	14	16	16	16	16
T_s^{c0}	8	8	13	17	17	8	8	8	13
T_s^{h0}	57	64	64	57	62	57	62	64	62
p_s	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,029	0,091	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,223	0,102	0,207	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$

s	10	11	12	13	14	15	16	17	18
V_s	16	16	16	19	19	19	19	19	19
T_s^{c0}	13	17	17	8	8	8	13	17	17
T_s^{h0}	64	57	64	57	62	64	57	57	64
p_s	0,04	0,029	$3,69 \cdot 10^{-4}$	0,02	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$9,85 \cdot 10^{-4}$	0,179	$1,79 \cdot 10^{-3}$	0,067

Първият ред на горната таблица съдържа номера на съответния сценарий. Стойностите на стохастичните параметри, които го формират и вероятността, с която се появява всеки един от сценариите, са записани в съответните колони.

4.4.2. Граници на променливите за първия и втория стадий

Променливи за първия и втория стадий на формулираната двустадийна оптимизационна задача са непрекъснати величини с граници. С помощта на формулираната оптимизационна задача, са определени границите на изменение на стойностите за основното оборудване, променливите за първия стадий. Те са представени в Таблица 4-2.

Таблица 4-2. Стойности на граници на променливите за първия стадий.

Топлообменник $HE-c$ [m ²];	Топлообменник $HE-h$ [m ²];	Топлинен резервар - HS [m ³];
$13,65 \leq A^c \leq 53,77$	$26,39 \leq A^h \leq 105,63$	$31,02 \leq V^m \leq 75,4$

Стойностите на границите на променливите за втория стадий са представени в Таблица 4-3.

Таблица 4-3. Стойности на границите на променливите за втория стадий - времената за нагряване и охлаждане в съответните топлообменници.

В топлообменник $HE-c$ [s]	В топлообменник $HE-h$ [s]
$900 \leq \tau_s^c \leq 2640, \quad \forall s, s \in S$	$900 \leq \tau_s^h \leq 1320, \quad \forall s, s \in S$

4.4.3. Решения на двустадийната стохастична оптимизационна задача

С помощта на **BASIC** генетичен алгоритъм дефинираният стохастичен проблем (4-10)–(4-44) е решен многократно за всяко едно от множествата от сценарии S1 –S14 единствено за множество S15 е получено само едно решение.

По-долу подробно са обсъдени единствено решенията, получени за множествата от сценарии S1 и S15. В Таблица 4-4 са представени очакваните годишни капиталови разходи за реконструкция и експлоатация на ATAD системата и тяхната разбивка. В Таблица 4-5 са показани стойностите на основното и спомагателното оборудване, при които са достигнати съответните решения. За сценарий S1 са получени три различни решения, отбелязани съответно с a, b и c. За S15 решението е само едно. В скоби е отбелязан броят на сценариите в множеството.

Таблица 4-4. Очаквани годишни капиталови разходи за реконструкция и експлоатация на ATAD системата.

Сценарии/ Брой решения	Годишни разходи за реконструкция и експлоатация [CU]	Капиталови разходи за основното оборудване [CU]	Капиталови разходи за спомагателното оборудване [CU]	Разходи за експлоатация [CU]
S1 (18) a	2839,43	1470,00	979,29	390,15
S1 (18) b	2550,92	1333,57	889,14	328,21
S1 (18) c	2546,73	1354,43	882,29	310,01
S15 (238)	2977,72	1431,43	1078,57	467,72

Таблица 4-5. Стойности на основното и спомагателното оборудване, при които са достигнати съответните решения.

Сценарии/ Брой решения	Топлообменници [m ²]		Топлинен резервоар [m ³]	Помпи [m ³ /h]		
	<i>HE-c</i>	<i>HE-h</i>	<i>V</i>	<i>PC</i>	<i>PH</i>	<i>PM</i>
S1 (18) a	35,9	60,9	45,61	31,1	52,8	174,2
S1 (18) b	28,9	54,9	35,81	25,8	50,6	124,2
S1 (18) c	30,2	56,2	32,93	26,8	50,6	117,5
S15 (238)	33,1	57,8	57,48	35,6	62,0	229,9

Както се вижда от резултатите, очакваните годишни разходи за реконструкция и експлоатация се различават съществено. За да се избере най-подходящото решение, което обхваща в най-широки граници енергийно интегрираната ATAD система от въздействието на стохастичните параметри, трябва да се определи съответния индекс на гъвкавост за всяко от получените решения.

4.5. Индекс на гъвкавост

Индексът на гъвкавост определя най-широките граници на несигурните параметрите, в които е осигурена осъществимост на процеса, и позволява идентифицирането на "най-лошите случаи" от условия, които ограничават гъвкавостта на процеса.

В настоящата глава е предложен приблизителен метод за оценка на Индекса на гъвкавост на получените решения. Целта на метода е в скалираното хиперпространство на изменение на несигурните параметри, без да се нарушават ограниченията за осъществимост на процеса за дадено решение, получено с помощта на семейство от сценарии S , да се впише хиперправоъгълник, чийто обем, отнесен към общия обем на скалираното стохастично пространство, да има най-голяма стойност.

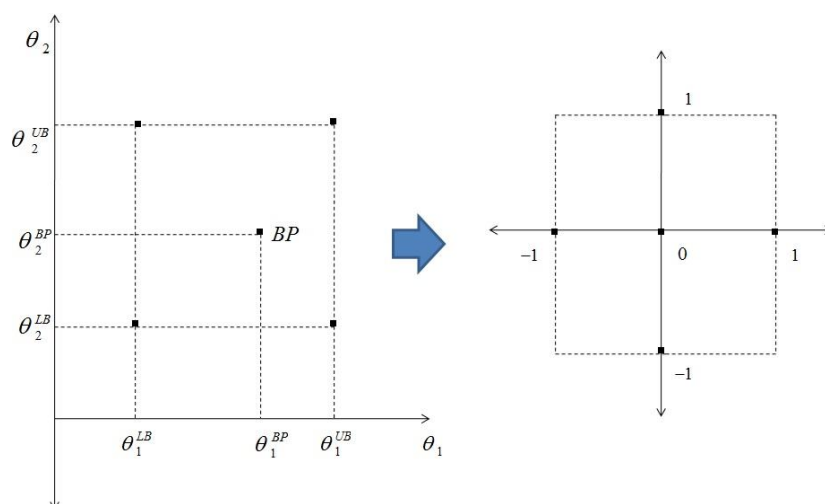
4.5.1. Скалиране на хиперпространството и представяне на Индекса на гъвкавост

За оценката на Индекса на гъвкавост от изключително значение е скалирането на хиперпространството. Нека с N е отбелязан броят на стохастичните параметри. В стохастичното пространство всеки един стохастичен параметър θ_n се изменя в границите $\theta_n^{LB} \leq \theta_n \leq \theta_n^{UB}$, $\forall n, n \in N$. Нека с BP ($\theta_1^{BP}, \dots, \theta_n^{BP}, \dots, \theta_N^{BP}$) в стохастичното пространство е отбелязана точка, условно наречена *Базова* (Basic Point), за която е известно, че стохастичната задача има решение.

Първата стъпка на предложения метод за оценка на Индекса на гъвкавост е центрирането на стохастичното пространство в *Базовата точка*. Тя става начало на координатна система. Несигурното хиперпространство се скалира по отношение на нея, така че във всяко направление $n, n \in N$, долната и горната граница на стохастичните параметри $-\theta_n^{LB}; \theta_n^{UB}$ да приемат съответно стойностите -1 и 1, както е показано на фигура 4-3 за пространство от два стохастични параметъра. Тогава, обемът на скалираното хиперпространство на несигурните параметри е правилен хиперправоъгълник (хиперкуб), за който дължината на страните му във всяко направление n се определя от два единични вектора – положителен и отрицателен. Ако се вземе модула на отрицателния вектор, то обемът на хиперкуба е:

$$V = \prod_{n=1}^{n=N} (|-1|_n + 1_n) = 2^N. \quad (4-45)$$

Всеки несигурен параметър θ_n , в зависимост от мястото, което заема по отношение на θ_n^{BP} , в скалираното пространство приема, или положителни стойности от $0 \leq \eta_{n,1} \leq 1$, ако $\theta_n^{BP} \leq \theta_n \leq \theta_n^{UB}$, или отрицателни стойности от $-1 \leq \eta_{n,2} \leq 0$, ако $\theta_n^{LB} \leq \theta_n \leq \theta_n^{BP}$.



Фигура 4-3. Скалиране на двумерно стохастично пространство.

Втората стъпка е свързана с представянето на Индекса на гъвкавост в новото скалирано пространство. Стартирайки от центъра на координатната система, в скалираното пространство се вписва хиперправоъгълник, чийто страни се разтягат в

посока на съответните граници. Процесът продължава до момента, в който или ограниченията за осъществимост на работата на системата се нарушат, или се достигнат границите на скалираното хипер-пространство. Процесът на разтягане на хиперправоъгълника продължава до момента, в който всички ограничения тип равенства (h_1 и h_2) и тип неравенства (g_1) се спазват. В края на процеса, на осите на координатната система, се определят координатите на върховете точки на вписания хиперправоъгълник, определящи границите на осъществимост на процеса в скалираното пространство.

Обемът на така вписания хиперправоъгълник се определя чрез дължините на съответните вектори $0\eta_{n,i}^*$, които в зависимост от местоположението си са положителни или отрицателни:

$$V^* = \prod_{n=1}^N \sum_{i=1}^2 |0\eta_{n,i}^*|, \quad (4-47)$$

където $i=1$ при $0 \leq \eta_{n,i} \leq 1$ и $i=2$ при $-1 \leq \eta_{n,i} \leq 0$.

Индексът на гъвкавост се определя като отношение между обема на вписания хипер-правоъгълник към обема на цялото скалирано стохастично пространство (т.е. хиперкуба):

$$JJ = \frac{\prod_{n=1}^N \sum_{i=1}^2 |0\eta_{n,i}^*|}{2^N}. \quad (4-48)$$

Този начин на представяне позволява да се определи Индекса на гъвкавост, за изследвано конкретно решение на стохастичната задача, където са известни решенията за първия стадий D^* и границите на променливите за втория стадий $\overline{W}^{\min} \leq \overline{w} \leq \overline{W}^{\max}$, като се формулира и реши следния обобщен оптимизационен проблем:

$$JJ = \text{MAX} \frac{\prod_{n=1}^N \sum_{i=1}^2 |0\eta_{n,i}^*|}{2^N} \quad (4-49)$$

4.5.2. Определяне на Индекса на гъвкавост за АТАД системата

Определянето на Индекса на гъвкавост за всяко едно от получените решения има за цел да посочи кое от тези решения позволява енергийно интегрираната АТАД система да работи устойчиво в най-широки граници на изменение на несигурните параметри.

4.5.2.1. Необходими данни

Необходимите данни за формулирането на проблем (4-49) са получени от решението на двустадийния стохастичен проблем. Това са:

A^{c*} - топлообменната повърхност на $HE-c$ [m^2];

A^{h*} - топлообменната повърхност на HE - h [m^2];

V^{m*} - обемът на топлинния резервоар [m^3].

Те са допълнени с границите на изменение на променливите за втория стадий времето, за което студения/горещ флуид се нагрява/охлажда съответно в HE - c и HE - h :

$$\tau^{c \min} \text{ и } \tau^{c \max} ;$$

$$\tau^{h \min} \text{ и } \tau^{h \max} ,$$

както и с границите, в които се променят съответните стохастични параметри:

$$V^{\min} \leq V \leq V^{\max} ;$$

$$T^{c0 \min} \leq T^{c0} \leq T^{c0 \max} ;$$

$$T^{h0 \min} \leq T^{h0} \leq T^{h0 \max} .$$

Известни са и координатите на базовата точка $BP \Rightarrow \{V^{BP}, T^{c0BP}, T^{h0BP}\}$.

4.5.2.2. Независими променливи

Стохастичното пространство е триизмерно. Първото измерение е свързано с изменението на обема (масата) на зарежданата/източвана утайка, второто – с изменението на температурата на зарежданата студена сурова утайка, а третото – с изменението на температурата на източваната гореща обработена утайка.

Въвеждат се непрекъснатите независими променливи $\eta_{n,i}$, $n=1,2,3$; $i=1,2$, чрез които се управлява изменението на координатите в скалираното стохастично пространство. Те варират в следните граници:

$$0 \leq \eta_{n,1} \leq 1, \forall n, n = 1,2,3; \quad (4-50)$$

$$-1 \leq \eta_{n,2} \leq 0, \forall n, n = 1,2,3.$$

4.5.2.3. Математичен модел и целева функция

А. За зададените стойности на A^{c*} , A^{h*} и M^{m*} математичният модел на топлинно-интегрирана АТАД система трябва да се преформулира така, че всички температури в интеграционната схема да се определят като функции на $M_k, T_k^{c0}, T_k^{h0}, \tau_k^c, \tau_k^h$ за $\forall k, k \in K$.

Б. Ограниченията, следящи за физическата осъществимост на топлообмена в топлообменниците.

В. Ограничения, следящи за ефективността на схема за топлинна интеграция на АТАД системата.

Г. Ограничения, гарантиращи достатъчни температурни нива в топлинния резервоар в края на процесите нагряване/охлаждане.

Целева функция цели да се определи максималната стойност на Индекса на гъвкавост.

$$JJ = \text{MAX} \frac{\prod_{n=1}^N \sum_{i=1}^2 |\theta_{n,i}|}{2^N}. \quad (4-72)$$

4.5.2.4. Резултати

С помощта на определените Индекси на гъвкавост са оценени получените решения за реконструкция на енергийно интегрираната АТАД система в условията на стохастично променящи се параметри. Избраната Базова точка $BP\{V^{BP}, T^{c0BP}, T^{h0BP}\}$ е $\{18,93; 18,24; 66,27\}$. Границите на изследваното стохастично пространство са $12 \leq V \leq 20$; $5,6 \leq T^{c0} \leq 20,2$; $54,5 \leq T^{h0} \leq 68,1$.

Определените Индекси на гъвкавост и границите, в които интегрираната АТАД система е защитена, варират в широк диапазон, като Индексите на гъвкавост са в много широк диапазон от 0,184431 за решение S5 (18) с до 0,595509 за решение S15 (238). Трябва да се отбележи, че при всички решения енергийно интегрираната АТАД система е защитена от въздействието на стохастичните параметри до тяхната горна граница. Решенията с най-високите стойности за Индекса на гъвкавост са представени в Таблица 4-6.

Таблица 4-6. Решения с най-високи стойности за Индекса на гъвкавост.

Сценарии/ Брой решения	Индекс на гъвкавост	V^{\min}	V^{\max}	$T^{c0\min}$	$T^{c0\max}$	$T^{h0\min}$	$T^{h0\max}$
S15 (238)	0,595509	13,59	20,00	10,6	20,2	58,3	68,1
S11 (25) а	0,594872	14,02	20,00	9,3	20,2	58,9	68,1
S1 (18) а	0,512430	13,33	19,83	8,3	20,2	61,6	68,1
S7 (22) а	0,498845	14,58	20,00	7,2	20,2	62,7	68,1
S3 (19) с	0,495389	15,46	20,00	7,7	20,2	61,1	68,1

Не без значение е и стойността на свързаните с реконструкцията годишни разходи, Таблица 4-7.

Таблица 4-7. Годишни разходи за реконструкция за решенията с най-висок Индекс на гъвкавост.

Сценарии/ Брой решения	Годишни разходи за реконструкция и експлоатация [CU]	Капиталови разходи за основното оборудване [CU]	Капиталови разходи за спомагателното оборудване [CU]	Разходи за експлоатация [CU]
S15 (238)	2977,72	1431,43	1078,57	467,72
S11 (25) a	2990,51	1471,43	1116,29	402,80
S1 (18) a	2839,43	1470,00	979,29	390,15
S7 (22) a	2803,60	1488,57	947,29	367,74
S3 (19) c	2807,45	1487,14	947,71	372,59

Важно е да се отбележи, че не винаги най-ниските капиталови и експлоатационни разходи на оборудването са съответно най-доброто решение, което гарантира устойчива работа на ATAD системата.

4.6. Изводи от четвърта глава

В резултат на проведените изследвания в тази глава са:

1. Дефинирани и решени основните задачи на системно-ориентирания подход за оптимална реконструкция на енергийно-интегрирана ATAD система за редуциране на въздействията на стохастичните параметри.
2. За дискретизацията на пространството на стохастичните параметри е използван прост евристичен метод за редуциране на броя на сценариите при двустадийното стохастично програмиране предложен от Кагурриах et al., (2010). Методът се основава на следната евристика – *сумата от вероятностите на новите сценарии, в които се появява стойността на несигурния параметър $-\theta_i^{j_i}$ трябва да е равна на $p_i^{j_i}$* и води до дефиниране на оптимизационен проблем в термините на линейното програмиране (LP). С негова помощ са получени 15 различни множества от сценарии.
3. Дефинирана е задачата на двустадийното мултисценарийно стохастично програмиране за редуциране въздействието на несигурните параметри в ATAD система.
 - За целта променливите са разделени на две множества - *за първия стадий* и съответно, *за втория стадий*. Стойностите на променливите за първия стадий се отнасят до проектирането на системата. Те са еднакви за всички сценарии. Стойности на променливите на втория стадий трябва да „оберат” въздействието на вече разкрилите се стохастични параметри така, че да се постигне осъществима работа на системата.
 - Математичният модел на топлинно-интегрирана ATAD система е преформулиран в термините на двустадийното стохастично програмиране.

Всички температури в интеграционната схема са определени като функции на променливите на първия и втория стадий. Моделът е допълнен с ограничения, следящи за физическата осъществимост на топлообмена в топлообмениците, за ефективността на топлинната интеграция, както и за температурите в топлинния резервоар.

- Дефинирана е целева функция, която включва очакваните годишни капиталови и експлоатационни разходи.

4. За решаване на дефинираната стохастичната оптимизационна задача е използван **BASIC** генетичен алгоритъм. Той позволява да бъде представена идеята за декомпозиция на сценарии чрез структурата на индивида.

5. Дефинираният стохастичен проблем е решен многократно за всяко едно от множества от сценарии S1–S15. Показано е, че дори в рамките на едно множество от сценарии решенията не са еднозначни. Очакваните годишни разходи за реконструкция и експлоатация се различават съществено. Взemanето на решение кое от тези решения трябва да бъде избрано се осъществява с помощта на т.н. Индекс на гъвкавост.

6. Предложен е приблизителен метод за оценка на Индекса на гъвкавост на получените решения. Целта е в скалираното хиперпространство на изменение на несигурните параметри, без да се нарушават ограниченията за осъществимост на процеса за дадено решение, получено с помощта на семейство от сценарии S , да се впише хиперправоъгълник, чийто обем отнесен към общия обем на скалираното стохастично пространство да има най-голяма стойност. Математически е дефиниран оптимизационния проблем за определяне на Индекса на гъвкавост за получените решения. Получените резултати показват, че най-ниските капиталови и експлоатационни разходи на оборудването не винаги са най-доброто решение, което гарантира устойчива работа на АТАД системата

5. Верификация на предложения системно-ориентиран подход и определяне на оптимални и устойчиви работни условия на енергийно интегрирани ATAD системи в условията на несигурност

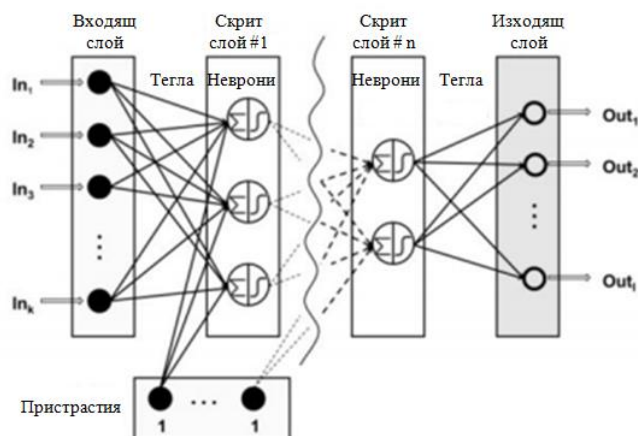
Целта на верификацията на енергийно-интегрирана ATAD система е, чрез използване на реални данни за зададен период, да се демонстрира как енергийната интеграция влияе на работата на биореакторите и по-специално на температурните режими и стабилизацията на утайката. За да се осъществи верификацията е необходимо числено да се симулира работата на енергийно-интегрирана ATAD с включени модели на индустриален ATAD биореактор. За целта е създаден модел на индустриален ATAD биореактор с използване на подхода на Изкуствените невронни мрежи (Artificial Neural Network - ANN). Той позволява при зададени стойности на зареждания поток (обем, температура, съдържание на твърдите вещества и летливите твърди вещества), както и температурата в биореактора при зареждането, да се предскаже дълбочината на теремичния шок, очакваната температура в края на процеса и степента на редукцията на летливите твърди вещества.

5.1. Моделиране на ATAD биореактори с изкуствени невронни мрежи.

5.1.1. Общо описание на Изкуствените невронни мрежи.

Изкуствените невронни мрежи спадат към класа модели тип „черна кутия“. ANN са приложими за моделиране на богата гама явления в много области, чрез разглеждане само на наличните стойности на променливите на процеса. Изкуствените невронни мрежи (ANNs) симулират поведението на биологичните невронни системи. Те се състоят от входове, изходи и един или повече скрити слоя с множество неврони в тях. Връзките между тях се модифицират чрез тегла (съответстващи на силата на съответните сигнали).

На фигура 5-1 е показана ANN, предаваща сигналите в права посока, състояща се от няколко скрити слоя с различен брой на невроните във всеки от тях.



Фигура 5-1 Изкуствена невронна мрежа предаваща сигналите в права посока

ANN моделът се включва в оптимизационна рамка, използваща като оптимизационен критерий Метода на най-малките квадрати, като се цели минимум на целевата функция.

5.1.2. Определяне на входовете и изходите за ANN модел на ATAD биореактор.

Работата на ANN се влияе съществено от броя на входовете и изходите на модела, както и от неговата архитектура, т.е. броят на скритите слоеве и броят на невроните във всеки скрит слой. С цел правилно да се определят свързаните входове и изходи подробно е представено описание на процеса на зареждане и източване на ATAD биореактор. На Таблица 5-1 са показани определени входове и изходи за целите на моделирането на ATAD биореактори с помощта на ANN.

Таблица 5-1. Избрани входове и изходи за целите на моделирането.

	Биореактор (R)	
	Входове	Изходи
Размер на партидата; [%]	Q_N	
Общ състав на твърдите вещества; [%]	TS_N	
Състав на летливите твърди вещества; [%]	VS_N	
Температура на входящата утайка; [°C]	TAD_N	
Температура в биореактора преди отварянето му за текущия ден; [°C]	$T_{max_{N-1}}$	
Състав на летливите твърди вещества на следващия ден; [%]		VS_N
Дълбочина на термичния шок; [°C]		T_{min_N}
Температурата в биореактора преди отварянето му на следващия ден; [°C]		T_{max_N}

5.1.3. Архитектура и обучение на ANN модел на ATAD биореактор.

За целите на ATAD биореактор са изследвани няколко различни архитектури на невронни мрежи с един и два скрити слоя, които са верифицирани и оценени с помощта на реални данни и оценки, използвани при ANN моделирането. Изследваните архитектури са с един (In,H1,Out) и два (In,H1,H2,Out) скрити слоя, както следва (5,6,3); (5,7,3); (5,5,3,3) и (5,6,3,3).

5.1.4. Валидиране на ANN модел на ATAD биореактор.

Последният етап е свързан с валидиране на получените модели като за целта се използва отделената група от образци. За оценка на ефективността на създадените ANN модели и тяхната възможност добре да предсказват необходимите изходи са използвани три мерки – Корен от средноквадратичната грешка (Root mean square error RMSE); Средна абсолютна процентна грешка (Mean absolute percentage error MAPE); и

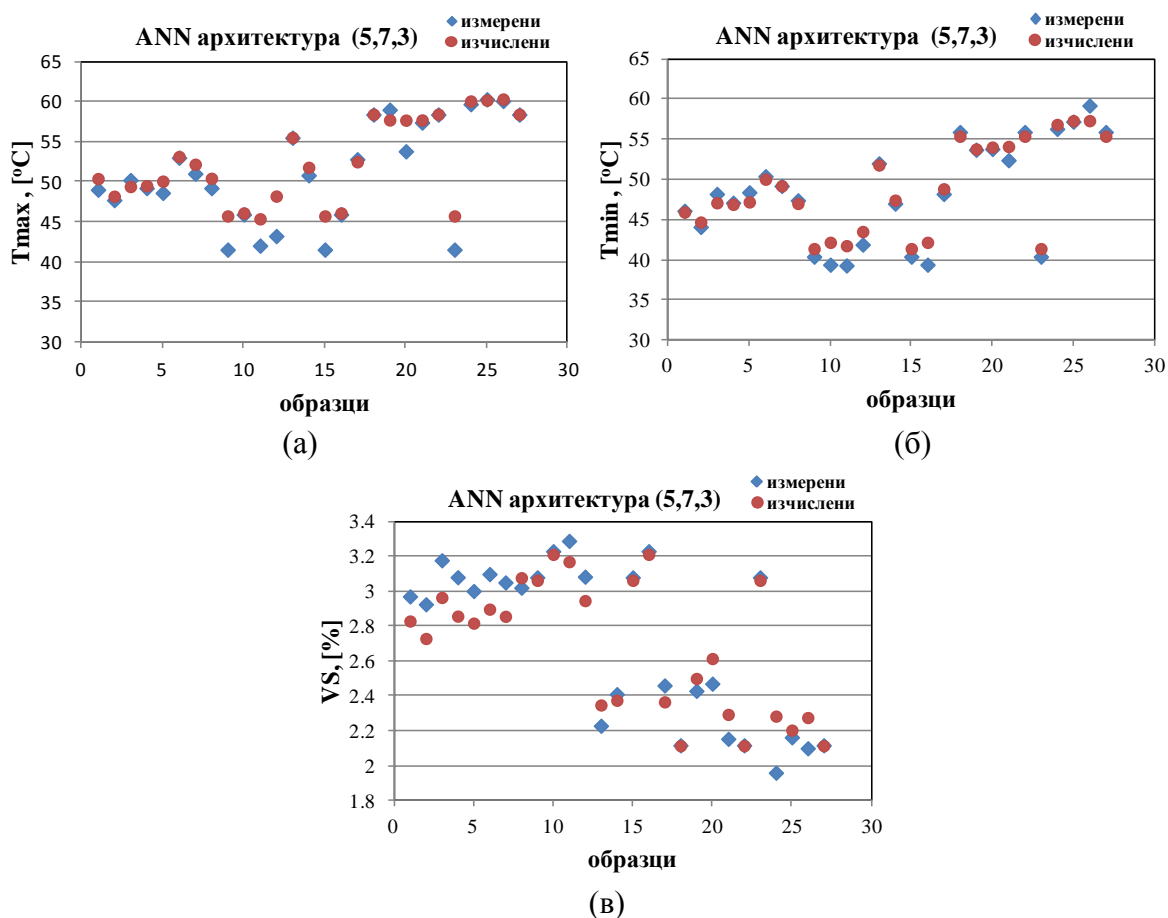
Линейния корелационен коефициент (R). Стойностите за RMSE, MAPE и R за съответните модели са представени в Таблица 5-2.

Таблица 5-2. Стойности на RMSE, MAPE и R за избраните архитектури на ANN модела.

ANN архитектури	RMSE			MAPE			R		
	Tmax1	Tmin	VS1%	Tmax1	Tmin	VS1%	Tmax1	Tmin	VS1%
(5,6,3)	2,072	1,242	0,144	2,757	2,046	4,019	0,972	0,987	0,953
(5,7,3)	2,069	1,198	0,137	2,721	1,929	4,051	0,971	0,988	0,965
(5,5,3,3)	1,728	1,334	0,355	2,202	2,268	12,77	0,976	0,972	0,753
(5,6,3,3)	5,865	5,837	0,437	8,947	9,17	13,66	0,452	0,449	0,339

Съгласно представените данни в таблицата се вижда много добра съгласуваност между стойностите на мерките за архитектури (5,6,3) и (5,7,3). За тях, стойностите на RMSE и MAPE са почти равни. Стойностите на корелационните коефициенти клонят към 1, което показва много добра корелация между измерените и изчислени данни за Tmax, Tmin и VS.

На фигури 5-2 (а,б,в) е представено сравнение между измерените и изчислени стойности за Tmax, Tmin и VS за най-добрата архитектура (5,7,3), която е селектирана за моделирането на ATAD биореакторите.



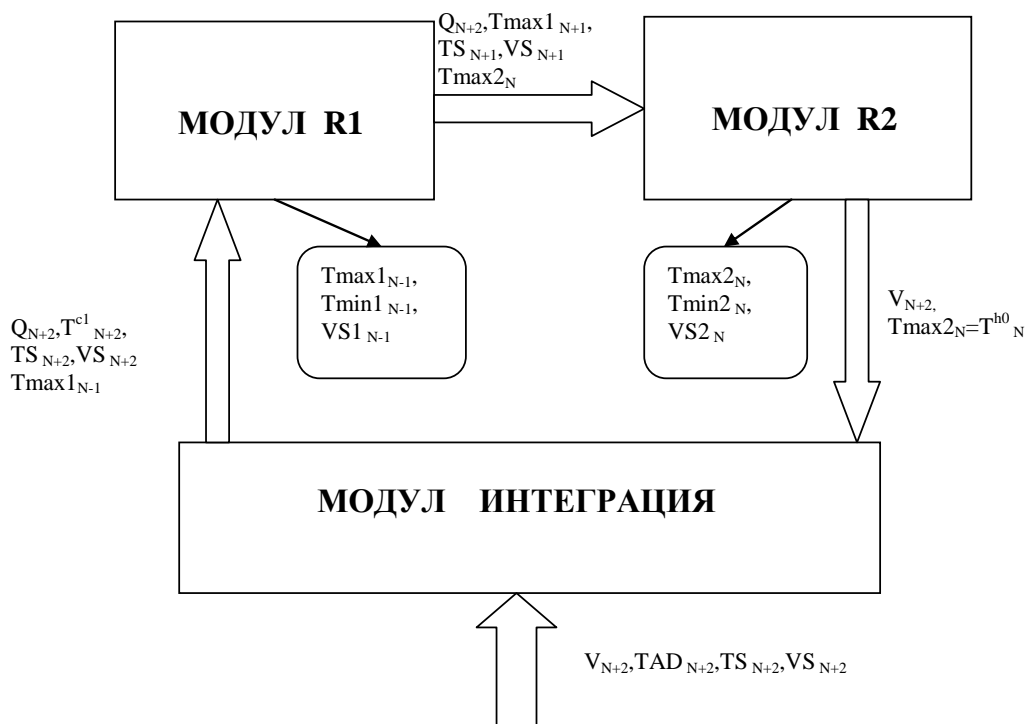
Фигура 5-2. Архитектура (5,7,3). Сравнение между измерените и изчислени стойности за: (а) Tmax; (б) Tmin; и (в) VS.

5.2. Симулиране работата на енергийно интегрирана ATAD система

Най-добрият ANN модел на ATAD биореактор както и интеграционната рамка с най-добрите получени решения, с най-висок индекс на гъвкавост, са обединени с цел числено симулиране на работата на енергийно-интегрирана ATAD система. ANN моделът на ATAD биореактора е включен като два последователно свързани модула за симулиране на биореакторите съответно от първото и второто стъпало. Осигурено е подходящо предаване на данните между модулите, симулиращи биореакторите и модула на енергийната интеграция.

Отчетен е фактът, че при зареждането в първия биореактор на някоя партида N+2, то от втория биореактор се зауства горещ поток с обем, равен на обема на зареждания V_{N+2} . Той обаче, е резултат от изпълнение на партида N. От всеки от модулите се извежда информацията за достигнатата максимална температура в края на процеса, дълбочината на термичния шок и редуцията на летливите твърди вещества, съответно за партида N+1 от първия биореактор партида N от втория.

Симулирането започва от момента на предаване на данните от модула на втория биореактор към интеграционния модул. Определен е стартов набор от данни за изпълнението на първите две партиди в модулите на биореакторите, от които да започне процеса. Определен е и наборът (за зададен период) от реалните данни на зареждащият ATAD системата поток.



Фигура 5-3. Информационен поток между модулите в рамката за симулиране на ATAD системата

5.3. Резултати от симулирането на енергийно интегрирана ATAD система с реални данни

5.3.1. Използвани данни

За целите на симулирането са използвани два набора от реални данни за период от 15 дни, първият отнасящ се за зимния период, а вторият - за летния. Данните са представени в Таблицы 5-3. и 5-4.

Таблица 5-3. Реални данни за 15 дневен зимен период, използвани за симулиране на интегрираната ATAD система

Ден	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V[m ³]	19	15	15	14	14	17	15	15	15	16	16	15	14	15	16
TAD[°C]	9,2	9,8	9,9	12	9	9,1	9,5	9,6	9	5,6	7	9	10	10,3	7
TS [%]	5,95	5,2	5,85	6,1	5,9	5,95	6,5	6,3	6,3	6,2	6,3	6,4	6,4	6,2	6,3
VS[%]	4,47	3,9	4,4	4,58	4,21	4,25	4,64	4,5	4,27	4,54	4,62	4,69	5,04	4,64	4,62

Таблица 5-4. Реални данни за 15 дневен летен период, използвани за симулиране на интегрираната ATAD система

Ден	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
V[m ³]	15	14	16	17	19	17	18	18	18	18	17	18	19	17	15
TAD[°C]	13,2	13,4	14,4	15,1	16,1	16,1	19,2	20,2	18,2	19,2	20,2	18,2	17,6	17,5	19,1
TS [%]	5,6	5,5	5,6	5,6	5,7	5,7	6	6,3	6,4	6	6,3	6,4	6	6,3	5,65
VS[%]	4,02	3,95	4,02	4,03	4,23	4,22	4,44	4,66	4,85	4,44	4,66	4,85	4,25	4,47	4

За симулиране на интеграционния модул са използвани двете решения с най-висок индекс на гъвкавост, 0,595509 за S15(238) и 0,594872 за S11(25)а. Размерите на основното оборудване са представени в Таблица 5-5. Времената за транспортиране на горещия и студения флуид са тези, при които са определени размерите на спомагателното оборудване, съответно $\tau^c = 2640$ [s] и $\tau^h = 1320$ [s] и за двете решения.

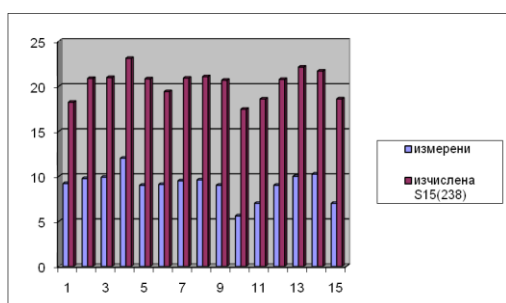
Таблица 5-5. Размерите на основното оборудване за решенията с най-висок индекс на гъвкавост.

Решения	Топлообменници [m ²]		Топлинен резервоар [m ³]
	HE-c	HE-h	V
S15(238)	33,1	57,8	57,48
S11(25)а	37,0	59,4	47,44

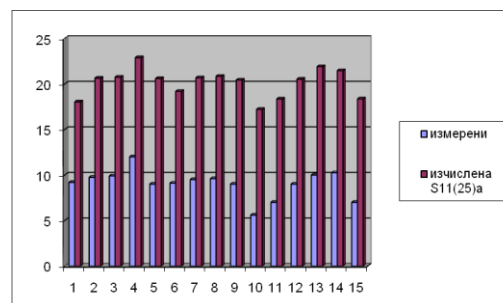
5.3.2. Резултати от симулирането и тяхното сравнение с реални данни

В резултат на симулирането, за зададени стойности на зареждащия ATAD системата поток (обем, температура, съдържание на твърдите вещества и летливите твърди вещества) е показано как се променя температурата на входния поток след преминаване през интеграционния модул и как тази нова температура се отразява на дълбочината на теремичния шок, очакваната температура в края на процеса и степента на редуция на летливите твърди вещества в двата модула, моделиращи ATAD биореакторите от първото и второ стъпало. Направено е и сравнение с действително измерените стойности на съответните показатели в биореакторите.

На фигура 5-4 е показано как се променят температурите на входящия поток след преминаване през интеграционния модул за двете решения S15(238) и S11(25)a. Вижда се, че изчислените температури за всяко от решенията са много близки. Сравнението им с реалните температури показва съществено повишаване на температурите на зареждания поток с около 8-10⁰С.



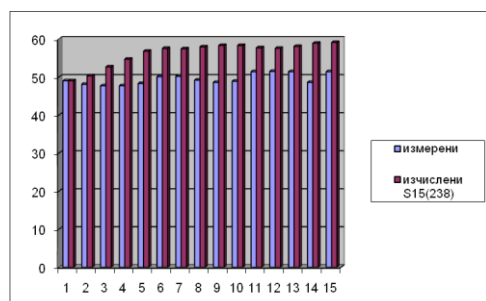
а)



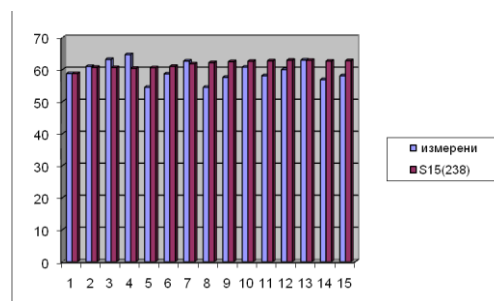
б)

Фигура 5-4. Сравнение на измерените и изчислени температури на входящия поток след преминаване през интеграционния модул за решение а) S15(238) и б) S11(25)a.

Поради близките стойности на резултатите, получени при симулирането с използване на решенията S15(238) и S11(25)a, по-долу ще бъдат коментирани само тези резултати отнасящи се до S15(238) за зимния период, където разликите между измерените и изчислените стойности са много по-отчетливо изразени.



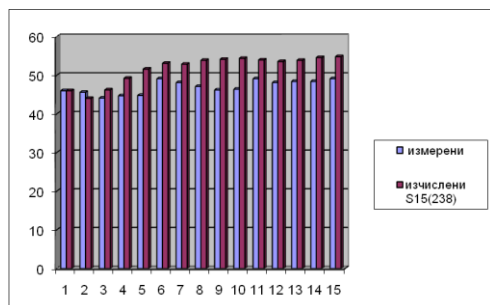
а) Биореактор 1



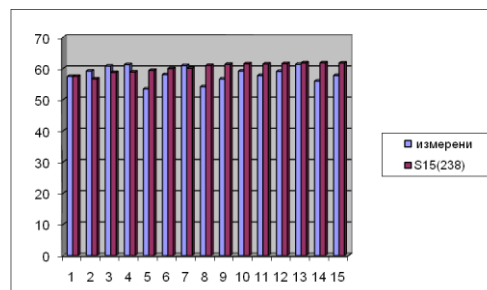
б) Биореактор 2

Фигура 5-5. Сравнение между измерените и изчислените за решение S15(238), с помощта на ANN модела при новите температурни условия на зареждащия поток, максимални работни температури в а) Биореактор 1 и б) Биореактор 2.

От графиките се вижда, че енергийната интеграция води до установяването на по-високи и устойчиви работни температури и в двата биореактора, много близки до оптималните работни температури от 55 °С за първия и 65 °С за втория биореактор.



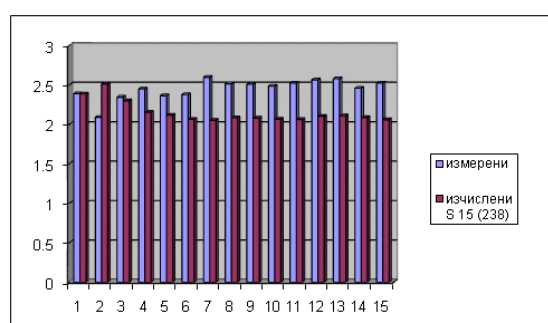
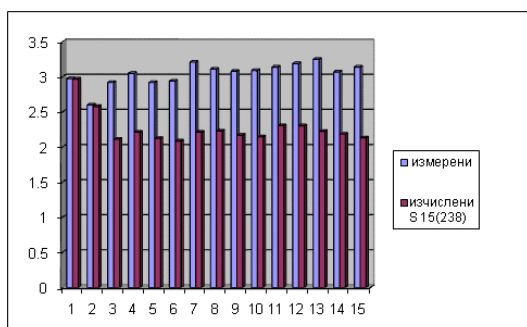
а) Биореактор 1



б) Биореактор 2

Фигура 5-6. Сравнение между измерената дълбочина на термичния шок в а) Биореактор 1 и б) Биореактор 2 и изчислената за решение S15 (238), с помощта на ANN модела при новите температурни условия на зареждащия поток.

От фигура 5-6 се вижда, че енергийната интеграция се отразява положително и върху намаляването на дълбочината на термичния шок. За първия биореактор, дълбочината на термичния шок се колебае в интервала от 44-49 °С, в резултат на интеграцията, тя се повишава значително над 50 °С достигайки стойности дори от 54 °С. Нещо повече, установяването на по-висока и устойчива работна температура в първия биореактор се отразява положително върху намаляването на термичния шок във втория. Дълбочината му е около 60 °С, което е с 2-5 °С по-малко от оптималната работна температура от 65 °С.



Фигура 5-7. Сравнение между измерения в края на процеса процент на летливите твърди вещества и изчисления, с помощта на ANN модела при новите входни условия на зареждания поток за решения S15 (238) в а) Биореактор 1 и б) Биореактор 2.

Подобряването на температурните условия в биореакторите води до съществено намаляване на процента на твърдите летливи компоненти в обработваните отпадъчни води, което е демонстрирано на сравнителните графики с измерените стойности за двата биореактора на фигура 5-7.

Получените резултати след симулирането показват частично подтискане на термичния шок в двата биореактора, като работните температури се подобряват с около 7-9° C за първото реакторно стъпало. Освен това и в двете фази на ATAD съоръжението, се получават по-устойчиви и близки до необходимите работни температури съответно ~ 55° C и ~ 63° C. Те доказват, че дневните колебания при суровите утайки могат да бъдат утилизирани чрез прилагане на енергийно интегриране. По този начин ние доказваме, че използване на наличната топлина в обработените газове, отделяща се от системата в околната среда, може да доведе до намаляване на температурните колебания в първия етап от биореактори.

5.4. Изводи от пета глава

В резултат на проведените изследвания в тази глава е:

1. Осъществена верификация на предложения системно-ориентиран подход и са определени оптималните устойчиви работни условия на енергийно интегрирани ATAD системи в условията на несигурност, чрез използване на реални данни за зададен период;

2. Създаден е модел на индустриален ATAD биореактор с използване на подхода на Изкуствените невронни мрежи (Artificial Neural Network - ANN), който позволява при зададени стойности на зареждания поток (обем, температура, съдържание на твърдите вещества и летливите твърди вещества) и температурата в биореактора, да се предскаже дълбочината на термичния шок, очакваната температура в края на процеса и степента на редукцията на летливите твърди вещества. Изследвани са няколко архитектури. Моделът е верифициран. Определен е този с най-добри възможности за предсказване на целите;

3. Създадена е рамка за числено симулиране на енергийно интегрирана ATAD система, включваща най-добрия ANN модел на ATAD биореактор и интеграционната рамка с най-добрите получени решения, с най-висок Индекс на гъвкавост. Осигурено е подходящо предаване на данните между модулите, симулиращи биореакторите и модула на енергийната интеграция;

4. Демонстрирана е работата на енергийно интегрирана ATAD система за два 15 дневни периода през зимния и летния сезон чрез числено симулиране на системата. Направено е сравнение между получените от симулацията изчислени резултати с реални измерени стойности на параметрите на ATAD системата. Въз основа на това сравнение е показано, че чрез подходяща енергийна интеграция може да се преодолее въздействието на несигурните параметри на зареждащия поток и да се установят устойчиви работни температури в ATAD биореакторите както и по-висока степен на разграждане на летливите твърди компоненти при обработване на отпадъчните води.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При разработването на настоящия дисертационен труд са направени следните по-важни научни, научно-приложни и приложни приноси:

1. Научни приноси

- 1.1. Създадена е схема за топлинна интеграция на потоците в АТАД система, подходяща за включване в стохастична оптимизационна рамка. Изведено е съответното аналитично математично описание и е направен анализ на ефективността на енергийната интеграцията на границите на стохастичното пространство.
- 1.2. Дефинирани са и са решени основните задачи на системно-ориентирания подход за оптимална реконструкция на енергийно-интегрирана АТАД система за редуциране на въздействията на стохастичните параметри, състоящи се в:
 - Дискретизацията на пространството на стохастичните параметри с използване на метод от литературата, Kaguriah et al (2010).
 - Анализ и разделяне на множествата на променливите на *променливи за първия стадий* и съответно на *променливи за втория стадий*.
 - Преформулиране на математичния модел на топлинно-интегрирана АТАД система в термините на двустадийното стохастично програмиране.
 - Дефиниране на ограниченията, следящи за физическата осъществимост на топлообмена в топлообменниците, за ефективността на топлинната интеграция и за температурите в топлинния резервоар.
 - Дефиниране на очакваната целева функция, включваща годишните капиталови и експлоатационни разходи и отчитаща наличието на множества сценарии.
- 1.3. Създаден е приблизителен метод за оценка на Индекса на гъвкавост на получените решения и математически е дефиниран оптимизационния проблем за определяне на Индекса на гъвкавост за получените решения.
- 1.4. Създаден е модел на индустриален АТАД биореактор с използване на подхода на Изкуствените невронни мрежи, позволяващ при зададени стойности на зареждания поток и температурата в биореактора, да се предскаже дълбочината на теремичния шок, очакваната температура в края на процеса и степента на редуцираната на летливите твърди вещества.

2. Научно приложни приноси

- 2.1. Реализирана е идеята за декомпозиция на сценарии чрез структурата на хромозомата при използването на **BASIC** генетичен алгоритъм за решаване дефинираната стохастичната оптимизационна задача
- 2.2. Създадена е рамка за числено симулиране на енергийно-интегрирана ATAD система, включваща най-добрият ANN модел на ATAD биореакторите и интеграционната рамка с най-добрите получени решения, с най-висок индекс на гъвкавост. Осигурено е подходящо предаване на данните между модулите, симулиращи биореакторите и модула на енергийната интеграция.

3. Приложни приноси

- 3.1. Демонстрирано е чрез численото симулиране на енергийно-интегрирана ATAD система с реалните данни за зимен и летен период и сравнение на получените резултати с измерените стойности за съществуващата система, че чрез подходяща енергийна интеграция може да се преодолее въздействието на несигурните параметри на зареждащия поток и да се установят устойчиви работни температури в ATAD и висока степен на разграждане на летливите компоненти в обработваните отпадъчни води.

Публикации и доклади в пълен текст на научни резултати по темата на дисертацията

1. **Vaklieva-Bancheva N., E. Kirilova, R. Vladova.** Capturing Uncertainties for Sustainable Operation of Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion Systems. *Computer Aided Chemical Engineering*, 33, Part B, 2014, ISSN:ISBN: 978-0-444-63434-4, 1729-1734. SJR:0.23
2. **Rayka Vladova,** Energy Integration of ATAD Systems. Energy Efficiency Analysis, Proceedings of the 5th International Science Conference “Education, science, innovations” ESI’2015, In Press
3. **Natasha G. Vaklieva-Bancheva, Raika K. Vladova, Elisaveta G. Kirilova.** Genetic Algorithm Approach for Optimization of Energy Integrated ATAD Systems under Uncertainties. Proceedings of 17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia “Energy-Ecology-Efficiency”, 2015, ISBN:978-86-6055-076-9, 851-870
4. **Elisaveta Kirilova, Natasha Vaklieva-Bancheva, Rayka Vladova.** Prediction of Temperature Conditions of Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion Bioreactors at Wastewater Treatment Plants. *International Journal Bioautomation*, 20, 2, 2016, ISSN:1314-1902, 289-300. SJR:0.228

Забелязани позовавания на публикациите:

Цитирана статия:

1. **Elisaveta Kirilova, Natasha Vaklieva-Bancheva, Rayka Vladova.** Prediction of Temperature Conditions of Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion Bioreactors at Wastewater Treatment Plants. *International Journal Bioautomation*, 20, 2, 2016, ISSN:1314-1902, 289-300. SJR:0.228

Цитиращи статии:

1. Vania Georgieva, (2017) Generalized Net Model of Mechanical Wastewater Pretreatment, *International Journal Bioautomation* 21(1), 133-144

Участие в национални и/или международни научни конференции

1. Natasha G. Vaklieva-Bancheva, Elisaveta G. Kirilova, *Raika K. Vladova,* **Capturing Uncertainties for Sustainable Operation of Autothermal Thermophilic Aerobic Digestion Systems**, международен европейски симпозиум ESCAPE 24 - 15.06-18.06.2014 г., постерен доклад
2. Raika K. Vladova, Natasha G. Vaklieva-Bancheva, *Elisaveta G. Kirilova,* **Energy Integration and Stochastic Optimization for Sustainable ATAD Systems**, 8-ма Национална конференция по химия” - 26-27.06.2014 г., постерен доклад

3. *Райка К. Владова*, Наташа Г. Ваклиева-Банчева, **Състояние и проблеми при Автотермално термомофилно аеробно очистване на битови отпадъчни води**, Петата постерна сесия „Младите учени в света на полимерите” - 05.05.2014 г., постерен доклад
4. *Raika K. Vladova*, **Energy Integration of ATAD Systems. Energy Efficiency Analysis** 5th International Science Conference “Education, Science, Innovations” - 10.06.2015г., устен доклад
5. *Natasha G. Vaklieva-Bancheva, Raika K. Vladova, Elisaveta G. Kirilova*, **Genetic Algorithm Approach for Optimization of Energy Integrated ATAD Systems under Uncertainties**, 17th International Symposium on Thermal Science and Engineering of Serbia “Energy-Ecology-Efficiency” 20.10.2015 - 23.10.2015 г., постерен доклад
6. *Райка К. Владова*, **Подход за идентификация на Индекса на гъвкавост при ATAD системи**, Юбилейна младежка научна сесия "Младите и химията" 08. 11. 2016 г., постерен доклад