



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – СОФИЯ
ИНЖЕНЕРНО-ПЕДАГОГИЧЕСКИ ФАКУЛТЕТ СЛИВЕН

Маг. инж. Радостина Атанасова Христова - Минчева

**ИЗСЛЕДВАНЕ НА ПРОЦЕСА И ТЕХНОЛОГИЯ ЗА АНАЕРОБНО
РАЗГРАЖДАНЕ НА БИООТПАДЪЦИ С ПРОИЗВОДСТВО
НА БИОГАЗ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертация за присъждане на образователна и научна степен

„ДОКТОР“

Област: 5. Технически науки

Професионално направление: 5.13. Общо инженерство

Научна специалност: Инженерна екология

Научни ръководители: **Доц. д-р инж. Валентин Камбуров**
 доц. д-р инж. Марин Т. Койчев

СЛИВЕН, 2017

Дисертационният труд е обсъден и насочен за защита от Катедрения съвет на катедра „Механика, машиностроене и топлотехника“ към Инженерно-педагогически факултет - Сливен на редовно заседание проведено на 27.11.2017г.

Публичната защита на дисертационният труд ще се състои на 16.03.2018г. от 14.00 часа в зала 1207 на ИПФ, гр. Сливен, бул. "Бургаско шосе" 59 на открито заседание на научното жури, определено със заповед № ОЖ-348 от 29.11.2017 г. на Ректора на ТУ София в състав:

1. Доц. Д-р инж. Койчо Атанасов - Председател
2. Доц. Д-р инж. Валентин Камбуров – Научен секретар
3. Проф. Д-р инж. Иван Домбалов
4. Проф. Д-р инж. Николай Козарев
5. Проф. Д-р инж. Йончо Пеловски

Рецензенти:

1. Проф. Д-р инж. Иван Домбалов
2. Проф. Д-р инж. Николай Козарев

Материалите по защитата са на разположение на интересуващите се в канцеларията на Инженерно-педагогичния факултет Сливен.

Автор: маг. Инж. Радостина Атанасова Христова – Минчева

Заглавие: Изследване на процеса и технология на анаеробно разграждане на биоотпадъци с производство на биогаз

Тираж 30 бр.

I. ОБЩА ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Актуалност на проблема

С глобално нарастване с над 70% след 1970г. до днес, най-висок дял имат емисиите на парникови газове от енергийния сектор, които имат ръст над 150%. По този начин намаляването на емисиите в енергийния сектор би повлияло силно глобалното замърсяване с парникови газове. Наред с другите си предимства, производството на енергия от възобновими източници може да помогне за намаляване на емисиите от парникови газове. Едина от бързоналагащите се технологии за получаване на енергия от възобновими източници е производството на биогаз, която позволява производството на енергия от регионално налични източници. Емисиите от въглероден диоксид от изгарянето на биогаза са част от естествения кръговрат на въглерода. Получените отпадъци от процеса са оползотворими в земеделието.

Анаеробното разграждане може да бъде разделено на четири фази: хидролиза/втечняване, ацидогенеза, ацетогенеза, метаногенеза. Тези четири фази представляват серия от реакции, които протичат последователно и в същото време паралелно в пространството на реактора, като същевременно имат въздействие една върху друга. Това, заедно с големия брой различни бактерии участващи в процеса и големия брой, взаимно влияещи си параметри на процеса, обуславят сложността на управление на инсталациите за производство на биогаз при промени в състава на входните суровини или изменение в параметрите на процеса.

Микроорганизмите разграждащи органичната материя са силно чувствителни към параметрите на средата като температура, алкалност, наличие на инхибиращи вещества, време на престой в реактора, натоварване по органично вещество.

Отделните подпроцеси на анаеробното разграждане взаимно си влияят, като изходните елементи от даден процес, могат да имат инхибиращо въздействие върху друг от процесите, което налага необходимостта от прецизно прогнозиране на протичането на процесите и пространственото им разграничаване.

В инсталациите за производство на биогаз обикновено се контролира непрекъснато температурата и състава на получения биогаз. Периодично се правят по-пълни анализи на параметри на субстрата, но невъзможността за извършване на тези анализи в реално време не позволява ефективно управление на процеса, който често е нестабилен. Нестабилността на процеса води до снижаване на скоростта на получавае на метан, намаляване на рН в реактора, повишаване на концентрацията на летливите мастни киселини, което води до прекъсване на работата на реактора. Това се обуславя от такива фактори като претоварване на биореактора или недостътно захранване със субстрат, действието на инхибитори, недостатъчен контрол на температурата. За да бъдат проектирани и експлоатирани инсталации за анаеробно разграждане е необходимо да бъдат разработени и съответните модели.

Цел на дисертационния труд, основни задачи и методи за изследване

Цел на дисертационният труд е да се приложат модели и алгоритми и да се разработи програмната им реализация, като по този начин се създаде възможност за прогнозиране на процесите на анаеробно разграждане в инсталациите за получаване на биогаз и да се подпомогне управлението на процесите, чрез прогнозирането им с използването на математически модели на процеса.

За постигането на основната цел се поставят следните задачи:

1. Да се направи анализ и оценка на съществуващите математически модели на процеса на анаеробно разграждане.
2. Да се подбере базов модел с достатъчно широка приложимост и точност, за да може да намери практическо приложение в управлението на процесите в реални условия, който да се адаптира към потребностите на експлоатацията на биогазовите инсталации и се реализира програмно.
3. Да се изследва експериментално, както и чрез прилагане на математическия модел, влиянието на параметрите на процеса върху получаването на биогаз.
4. Да се изследва експериментално процеса на самостоятелно анаеробно разграждане на птичи екскременти, с оглед на постигане на стабилен процес, като се предложи схема на биогазова инсталация, приложима в птицевъдните ферми.

За извеждане на получените в дисертационния труд резултати са използвани следните методи, средства, и похвати:

- Сравнителен анализ на съществуващите математически модели на анаеробното разграждане, като се отчитат броя на симулираните параметри на процеса, отчитането на инхибиращи фактори, приложимост на модела за различни видове субстрати;
- Прилагане на модела Anaerobic Digestion Model Nr. 1 за моделиране на процеса на анаеробно разграждане в инсталации за получаване на биогаз, симулиране на процеса на разграждане на птичи тор;
- Експериментално изследване на процеса на анаеробно разграждане на птичи тор в експериментален реактор. Измерване на количеството на получения биогаз, температурата и рН на средата при различни условия;
- Симулиране на процеса в експерименталния реактор с разработения модел, базиран на ADM1;
- Анализ на потенциала за прилагане на процеса на анаеробно разграждане в птицефермите, за задоволяване на енергийните потребности и определяне на параметрите на типова инсталация, която да намери приложение в средни по големина птицеферми.

Научна новост

Разработена приграмна реализация на математически модел на процеса на анаеробно разграждане на бомаса в средата на програмния продукт за математически пресмятания

MathCAD, който може да бъде използван за прогнозиране на процеса на получаване на биогаз при проектирането и експлоатацията на биогазовите инсталации.

Проучени са възможностите за използване на математични модели на процеса на анаеробно разграждане при управлението на инсталация за производство на биогаз.

Експериментално е определена степента на разреждане на птичия тор, при която може да бъде поддържан стабилен процес на самостоятелно анаеробно разграждане, както и работната температура на реактора. Предложена е инсталация за анаеробно разграждане на птичи тор, работеща при така определените условия. С реализирания програмно модел е симулирана работата на предлаганата инсталация.

Апробация на изследването

Дисертационният труд е докладван и обсъден на заседание на катедра «Механика, машиностроене и топлотехника» към Инженерно-педагогически факултет - Сливен на ТУ София.

Резултатите от дисертационния труд са публикувани както следва:

1. Христова Р., Изследване на съществуващите числени модели на процеса на анаеробно разграждане, сп. Устойчиво развитие, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 76-81
2. Христова Р., Числено моделиране на процеса на анаеробно разграждане, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 90-95
3. Христова Р., Експериментално изследване на процеса на анаеробно разграждане на птичи тор, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 104-108
4. Христова Р., Оползотворяване на отпадъците от птицеферми чрез анаеробно разграждане, сп. сп. Машиностроителна техника и технологии, кн. 2, 2017, 1312-0859, стр. 64-66, под печат

Публикации

По дисертацията са публикувани 4 самостоятелни научни статии.

Структура и обем на дисертацията

Дисертацията се състои от увод, пет глави, изводи за състоянието на проблема, цели и задачи на дисертационния труд, основни изводи, основни приноси, списък на използваната литература и списък на публикациите по дисертационния труд. Дисертационният труд съдържа 166 страници, включително 52 фигури, 22 таблици, оформени в увод, 5 глави, общи изводи и списък на използваната литература от 160 заглавия, от които 7 на кирилица и 153 на латиница.

II. СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Въведение

В света, населен от 7 милиарда души и годишно нарастване на населението със 78 милиона, ресурсите като храна, вода и въглеродни горива стават оскъдни и могат да бъдат изконсумирани. Освен това повишената консумация на ресурси води до непрекъснато генериране и натрупване на отпадъци. През 1972г. Meadows [96] анализира последствията от консантния растеж. При анализа на неговите предвиждания, проведени през 2004г [97], повечето от прогнозите се оказват изненадващо точни, което според автора изправя света пред две алтернативи: напредък чрез криза или напредък чрез проактивна промяна.

Много европейски страни и Европейската комисия разработват политики за подкрепа и повишаване на дела на възобновимите източници на енергия.

В допълнение към проактивните промени чрез политически инструменти, техническите иновации в областта на възобновимите източници на енергия са доказани като мощен инструмент и разработването на високоефективни процеси за получаване на енергия от възобновими източници и тяхното оптимизиране бележат силен напредък. По този начин дялът на енергията от възобновими източници нараства с около 50% между 2004 и 2010г. от 8.1% на 12.5% като енергията от биомаса има основен принос за това.

Относително малък дял от енергията от биомаса е получена от биогаз в инсталации за анаеробно разграждане [43]. Въпреки това, пазара на биогаз е показал експоненциален растеж, с увеличение от 450% и е един от най-бързо развиващите се пазари в Европа [43]. Високоенергийният биогаз е съставен основно от метан, въглероден диоксид, водород и сероводород. Получава се при разграждане на органична материя в отсъствието на кислород. Този процес се нарича анаеробно разграждане. Най-общо биогазовите инсталации могат да бъдат разделени на два вида: земеделски инсталации и индустриални инсталации. В селскостопанските инсталации се преработват основно енергийни култури и животински тор. Индустриалните инсталации преработват твърди отпадъци от общинските системи за сметосъбиране, органични отпадъци от хранителната промишленост и утайки от пречистването на отпадъчни води. Тъй като основния дял от биогазовите инсталации се пада на земеделските инсталации, настоящия дисертационен труд се фокусира именно върху тези инсталации.

Успехът на възобновимата енергия от биогаз се дължи на приложимостта на метода за различни видове органична маса, както растителна, така и от животински произход, както и на относителната простота на метода. Освен това производството на енергия посредством анаеробно разграждане не се влияе от външните климатични условия, което го прави подходящ за стабилно непрекъснато генериране на електрическа или топлинна енергия.

В България понастоящем функционират 12 инсталации за производство на биогаз. До момента не е правена цялостна оценка на потенциала за производство на биогаз в България, но е очевидно, че наличните инсталации делеч не го усвояват.

Стабилната и ефективна работа и контрол на инсталациите за биогаз може да се окаже трудно, поради високата сложност на биохимичния процес, който се състои от четири етапа,

които зависят един от друг и всеки изисква различен набор от оптимални параметри на процеса.

За да се постигне оптимизиране на процеса е необходима система за измерване на процесните параметри в реално време. В повечето случаи в биогазовите инсталации се измерва в реално време дебита на биогаза, неговия състав и температурата в реактора. Тези параметри не са достатъчни за адекватно управление на процеса. Целта на настоящия дисертационен труд е програмното реализиране и прилагането на модел на биогазовата инсталация, посредством който да се създаден възможност за оптимизиране на процеса на анаеробно разграждане за дадения входен субстрат, контролирайки различни параметри на процеса, което не би било възможно да се постигне при реално функционираща инсталация и наличните мониторингови данни за процеса.

ГЛАВА I

1. Анализ на съществуващото ниво и актуалност на темата

1.1. Предимства и недостатъци на енергията от биогаз

Едина от бързоналагащите се технологии за получаване на енергия от възобновими източници е производството на биогаз, която позволява производството на енергия от регионално налични източници. Емисиите от въглероден диоксид от изгарянето на биогаза са част от естествения кръговрат на въглерода. Получените отпадъци от процеса са оползотворими в земеделието.

Предимства:

- Производство на енергия от локално налични възобновими източници
- Ниски разходи за доставка на суровини, които са налични от земеделието в региона
- Почти въглеродно независим начин на получаване на енергия
- Използва се за локално елетро или топлоснабдяване, т.е няма дълга преносна мрежа
- Управляемо производство на енергия според потребностите
- Подобрено наторяване с отработената утайка в сравнение с директните отпадъци от земеделието.

Недостатъци:

- Високи разходи за първоначалната инвестиция и текущи разходи за обслужващ персонал
- Наличие на неприятни миризми
- Биогаз инсталации, които не са напълно херметични имат въздействие върху глобалното затопляне, т.к метана има 25 пъти по-висок парников ефект от
- Необходимост от значителни площи за складиране на отработената утайка
- Специалното отглеждане на енергийни култури може да доведе до някои проблеми, свързани износване на почвите и др.
- Производството на големи количества култури за биомаса за инсталациите за производството на биогаз може да бъде в конфликт с производството на други култури и индиректно да доведе до повишаване на цените на хранителната земеделска продукция (в изключение на случаите, когато се обработват отпадъци от земеделието).

1.2. Устройство на биогазовите инсталации

Биогазовите инсталации могат да имат различни контруктивни реализации и реализации на процеса на анаеробно разграждане (Фиг. 1.4).



Фиг. 1.4 Класификация на биогазовите инсталации

Процесите на анаеробно разграждане могат да бъдат класифицирани в зависимост от съдържанието на суха маса (TS) в субстрата, както и по броя на реакторите. Различават се едностепенни и многостепенни инсталации. В едностепенните инсталации има само един реактор, в който протичат всички етапи на анаеробното разграждане. При много степенните инсталации са налице два или повече реактора, при които отделните етапи в процеса могат да протичат в различни реактори.

По отношение на съдържането на сухо вещество в субстрата инсталациите могат да бъдат класифицирани на такива, работещи с високо съдържание на суха маса ($TS > 20$) или с ниско съдържание на суха маса. Инсталациите, работещи с високо съдържание на суха маса се наричат още със сухи ферментационни реактори, а тези с ниско съдържание на суха маса са с мокри ферментатори. При инсталациите с ниско съдържание на сухо вещество могат да се използват помпи, съ сравнително ниска консумация на енергия, за транспортране на субстрата, но същевременно са по-обемни, поради относително по-големия обем течност в реактора. При сухите инсталации субстрата не може да се транспортира с помпи. Тези инсталации са предимно с последователна работа, при съдържание на сухо вещество 20 до 50% и мезофилен процес.

Сухите ферментатори са обикновено с форма на контейнер с отвор за зареждане с биомаса. Могат да бъдат изработени и от пластмаса. Инсталациите работят с малко или без добавена течност. Бактериалните култури или свежа биомаса могат да бъдат добавяни само преди зареждането в реактора. При мокрите порцеси това не е необходимо поради непрекъснатата циркулация на субстрата в реактора. Течността, която е подгрята в топлообменник или се разприсква върху биомасата или се влива в реактора през тръба.

По отношение на движението на субстрата в реакторите могат да се различат два типа: последователно и непрекъснато действащи.

Обикновено избора на типа на реактора зависи от характеристиките на биоразградимия отпадък и по-специално съдържанието на твърди частици. Съответно процеса трябва да може да преобразува сухото вещество в газ без да се запуща реактора.

1.3. Суровинна база

Входящи материали

Като суровини за производството на биогаз чрез анаеробно разграждане се използват:

- Отпадъци от животновъдството;
- Отпадъци от хранително-вкусовата промишленост;
- Утайки от пречистването на отпадъчни води;
- Други органични отпадъци.

Анаеробните процеси са тясно свързани с течната среда. По този начин богатите на вода материали (течни органични отпадъци преди всичко) могат самостоятелно да бъдат оползотворени, чрез анаеробно разграждане, докато технологиите за компостиране изискват тези отпадъци да се смесват с обемисти структурни материали (т.е. зелени отпадъци), за да се намали съдържанието на влага и да се увеличи пропускателната способност на кислород.

В зависимост от химичния състав, входящите материали за производство на биогаз имат различен потенциал и състав, който действително зависи от технологията, параметрите на процеса и избраните условия.

Както се вижда, състава на биоразградимите отпадъци оказва съществено влияние на протичането на процеса на анаеробно разграждане. Това е от голямо значение при инсталации обработващи отпадъци с променлив във времето и трудно предвидим състав, кавито са например инсталациите за преработване на битови отпадъци. Променливостта на състава на субстрата може да доведе до нестабилност в работата на инсталацията и дори на прекъсвания на процеса. Възможностите за управление на процеса в инсталациите за биогаз въз основа на измервания на параметри в реално време са силно ограничени, поради невъзможността за непосредствено измерване на повечето параметри, с изключение на температурата и рН. От гледна точка на управлението на инсталациите и осигуряването на непрекъснатата им работа, интерес би представлявала възможността на прогнозиране на процеса на анаеробно разграждане, при промяна на водещия субстрат. В литературата не са налице данни за използването на математически модели при управлението на инсталациите за прогнозиране на тяхната работа и управлението на процеса, което би подобрило надеждността на тяхната експлоатация.

Добавки

При извършване на процеса ферментация могат да се използват някои добавки, за стабилизиране и оптимизиране на процесуа. Максималното количество добавки трябва да бъдат до 2% (на база свеж материал) от количеството на входящия материал. Трябва да се използват само добавки с деклариран и доказан ефект за подобряване на производството на биогаз. Могат да бъдат използвани следните ефективни групи вещества:

- флокуляционни агенти;
- микроелементи;
- утайтели;
- ензими;

- свободна и имобилизирана прокариотна и еукариотна биомаса;
- емулгатори (например тензиди);
- антипенещи агенти;
- комплексни агенти;
- антискаланти;
- макромолекули (натрий (Na), магнезий (Mg), калций (Ca), карбонат и фосфат).

Използването на добавки се базира предимно на емпирични данни за тяхното въздействие върху процеса. До момента няма практика за изследването на влиянието на добавките за стабилизиране и оптимизиране на процеса на анаеробно разграждане, основаваща се на моделиране на процеса. От гледна точка на проектирането и експлоатацията на инсталации би представлявала интерес възможността за моделиране на процеса на анаеробно разграждане на субстрата в присъствието на добавки, за да се оцени предварително стабилността и протичането на процеса.

1.4. Процес на анаеробно разграждане. Основни фази

Анаеробното разграждане може да бъде разделено на четири фази: хидролиза/втечняване, ацидогенеза, ацетогенеза, метаногенеза. Тези четири фази представляват серия от реакции, които протичат последователно и в същото време паралелно в пространството на реактора, като същевременно имат въздействие една върху друга.

Хидролиза

Тъй като комплексната органична материя не може да бъде разградена от микроорганизмите докато не е разградена на разтворими компоненти, анаеробното разграждане започва с хидролиза. При този процес органичната материя се разтваря до по-прости и по-разтворими междинни съединения, които могат да преминават през клетъчната мембрана. Веднъж преминали през клетъчната мембрана, тези съединения се използват да осигуряват енергия за клетъчния синтез. Тази фаза се нарича още втечняване, т.к. процеса на разграждане включва и дисоцииране на водата.

Ацидогенеза

Процеса следващ хидролизата е ацидогенезата (наричан също ферментация). Монозахаридите и аминикиселините, получени при хидролизата се разграждат до по-прости съединения като летливи мастни киселини, включващи пропионива и бутирова киселина, както и оцетна киселина. Организмите оксидиращи дългите мастни киселини изискват външен електронен акцептор като водородни йони или въглероден диоксид за да произведат водород или форми.

Разграждането на монозахаридите може да стане по различни начини, което води до появата на различни продукти като летливи мастни киселини, лактат и етанол, както и до отделянето на различно количество енергия. Кой процес ще е доминиращ зависи от няколко фактора, като концентрацията на субстрата, рН и концентрацията на разтворен водород. Например при много високо органично натоварване образуването на млечна киселина е значително. При рН над 5 се стимулира образуването на летливи мастни киселини, докато при рН < 5 се образува повече етанол. При рН под 4 всички тези процеси могат да престанат.

Ацидогенезата често е най-бързата стъпка в анаеробното разграждане на комплекса органична материя. Следователно нарушаването на този процес в резултат на различни токсични или инхибиращи съединения, води до спирането на производството на метан и акумулирането на дълги и къси мастни киселини.

Ацетогенеза

Както вече беше споменато преди, разграждането на високи органични киселини, образувани в ацидогенезата е етап на окисление без вътрешен електронен акцептор. По този начин, оксидиращите организми (обикновено бактерии) изискват допълнителен електронен акцептор като водородни йони или за превръщането до ацетат, въглероден диоксид и водород.

Това междинно преобразуване е от решаващо значение за успешното производство на биогаз, като тези съединения не може да се използват директно от метаногените.

Тъй като ацетогените са производители на водород и в същото време зависят от ниското парциално налягане на водорода, те поддържат синтропично (взаимно изгодно) отношение с водород консумиращите метаногенни археи. Този междувидов трансфер на водород, където метаногените играят ролята на консуматори на водород, позволява протичането на ферментацията. Синтропия означава булвално „взаимно изяждане“ и е особен случай на сътрудничеството между два метаболитно различни микробни вида, зависещи един от друг при разграждането на определена субстанция, обикновено по енергетични причини.

Ацетогенните бактерии не само печелят от консумиращите водород метаногенни бактерии, но и от ацетокласните метанорени, т.к. отстраняването на ацетатите влияе енергетично на реакциите на окисляване на летливите мастни киселини, по специално разграждането на изо-валерата, при което се образуват три молекули ацетат и само една водород. Освен това образуването на ацетати може да има инхибиращ ефект върху ацетогенезата.

Метаногенеза

По време на метаногенезата, ферментационните продукти като ацетати и H_2/CO_2 се преобразуват до и от метаногенните археи, които са стриктно анаеробни. Други метаногени са способни да растат върху въглеродни съединения като формиат, метанол и метиламин. Като цяло метаногените са специализирани в оползотворяването на субстрата, като някои от тях могат да използват само един субстрат.

Почти всички известни метаногенни видове са способни да произвеждат метан от H_2/CO_2 , докато само за няколко видове метаногени се смята, че да може да използва етилацетат като субстрат. Въпреки това, е оценено стехиометрично, че около 70% от метана, образуван в анаеробните биореактори е получен от ацетат. При получаването на метан от H_2/CO_2 се отделя повече енергия, отколкото при получаването му от ацетат и обикновено не е лимитиращо добива. Този процес обаче е от основно значение, поради това че поддържа парциалното налягане на водорода ниско.

1.5. Параметри на процеса на анаеробно разграждане

1.5.1. Процесни параметри

Температура

Температурата е един от основните параметри, осигуряващ стабилност на процеса, т.к. популациите на анаеробни бактерии могат да съществуват само в определен температураен диапазон. Освен това, внезапни промени или непрекъснати промени на температурата водят до инхибиране на бактериалните популации. Следователно осигуряването на постоянна температура на процеса е от решаващо значение за стабилната работа на биогазовата инсталация. Налични са три температурни диапазона:

- Психрофилни бактерии - $T < 25^{\circ}\text{C}$
- Мезофилни бактерии - $30^{\circ}\text{C} \leq T \leq 45^{\circ}\text{C}$
- Термофилни бактерии - $T > 50^{\circ}\text{C}$

Твърди вещества (TS) и летливи твърди вещества (VS)

Общото съдържание на сухо вещество и летливите сухи вещества в субстрата и утайката дават важна информация за очаквания дебит на биогаза и за ефективността на процеса. Освен това механичните части на инсталацията като помпи и бъркалки могат да работят с материал, със определено съдържание на сухо вещество.

Общото твърдо вещество представлява сухата материя като процентно съдържание от общата маса на субстрата или като грамове сухо вещество на килограм субстрат. Съдържанието на органично сухо вещество е органичната фракция от общото сухо вещество, измерено в % или g/kg.

pH

Стойността на pH за стабилен процес на анаеробно разграждане е между 6 и 9. Стойност на pH=6 свидетелства за инхибиране поради високо съдържание на летливи мастни киселини, а води до значително увеличаване на амоняка, който също има силен инхибиращ ефект. Поради факта, че първите две стъпки в анаеробното разграждане и особено хидролизата, изискват pH между 4 и 7 обикновено се използва двустепенно разграждане в два последователни реактора при разграждането на трудно разградим субстрат.

Освен това стойността на pH често се използва за да се оцени стабилността на процеса, т.к. високата концентрация на летливи мастни киселини от ацидогенния и ацетогенния процес води до спадане на pH.

Летливи мастни киселини, летливи органични киселини, общ неорганичен въглерод

Концентрацията на летливи мастни киселини носи важна информация за ефективността на процеса и неговата стабилност. По-високите концентрации водят до инхибиране и прекъсване на процеса. Абсолютната стойност на концентрацията на летливи мастни киселини, която е благоприятна за процеса е трудно да бъде определена, но отклоненията в концентрацията по време на процеса носи важна информация за него. Освен общата концентрация на летливи мастни киселини, важна за процеса е и концентрацията на конкретни киселини.

Амоний (NH₄)

Концентрацията на NH₄ играе важна роля, т.к NH₄ се трансформира в силния инхибитор NH₃.

Когато субстрата е животински или птичи тор, това предизвиква висока концентрация на NH₄, което води до високи нива на амоняк. По литературни данни, концентрация на NH₄ под 3000mg/l гарантират стабилен процес на анаеробно разграждане.

1.5.2. Дебит и качество на биогаза

Дебита и качеството на биогаза свидетелстват за ефективността на процеса на анаеробно разграждане. Изменението в дебита на биогаза автоматично означава, че е налице инхибиране, но причината за това инхибиране е неизвестна. Все пак е абсолютно необходим мониторинг на дневния добив на биогаз.

Качеството на биогаза се определя от неговия състав. Биогаза се състои от CH₄, CO₂, H₂, H₂S и O₂, от които CH₄, H₂ и H₂S представляват интерес за мониторинг.

1.5.3. Оперативни параметри

Хидравлично време на задържане (HRT)

Хидравличното време на задържане се определя въз основа на обема на анаеробния реактор V_D, m³ и дневния приток на субстрат x_s, m³/d:

$$HRT = \frac{V_D}{x_s}, d$$

Натоварване на реактора

Натоварването на реактора (L_D) е основния параметър на процеса на анаеробно разграждане, характеризиращ неговата производителност. Натоварването на реактора се определя като отношението на летливо твърдо вещество (VS_{in}, kg/d), и обема на реактора V_D:

$$L_D = \frac{VS_{in}}{V_D} \frac{kg}{m^3 d}$$

Обемна ефективност на разграждане на летливите твърди вещества и степен на тяхното разграждане

Разграждането на летливите твърди вещества определя ефективността на реактора. Обемната ефективност на разграждане на летливото твърдо вещество се дефинира като концентрацията на летливи твърди вещества в изходящата утайка.

Добив на биогаз и метан

Добива на биогаз и метан са представяни по отношение на концентрацията на летливо сухо вещество във входящия субстрат, което е още една мярка за ефективността на процеса. Колкото е по-висок добива на биогаз и метан, толкова по-висока е ефективността на процеса. Освен определянето на производството на биогаз и метан по отношение на притока на твърдо вещество, производителността може да се определи и по отношение на обема на реактора.

1.6. Моделиране на процеса на анаеробно разграждане

1.6.1. Постановка на проблема

Процесът на анаеробно разграждане е доста сложен и често нестабилен. Нестабилността на процеса води до снижаване на скоростта на получаване на метан, намаляване на рН в реактора, повишаване на концентрацията на летливите мастни киселини, което води до прекъсване на работата на реактора. Това се обуславя от такива фактори като претоварване на биореактора или недостъжно захранване със субстрат, действието на инхибитори, недостатъчен контрол на температурата. За да бъдат проектирани и експлоатирани инсталации за анаеробно разграждане е необходимо да бъдат разработени и съответните модели.

1.6.2. Моделиране на нарастването и развитието на микробната популация

В процеса на анаеробното разграждане вземат участие различни микроорганизми. Кинетиката на нарастването на микроорганизмите от всяка група може да бъде описана с изменението на концентрацията на биомасата в реактора $\frac{dX}{dt}$ в зависимост от специфичната скорост на нарастване на биомасата, специфичната скорост на отмиране на биомасата, концентрацията на биомасата във входящия и изходящия поток [49, 57, 61, 70, 78, 83, 91, 99]:

$$\frac{dX}{dt} = D(X_0 - X_B) + \mu X - k_d X \quad (1.8)$$

Където D е скоростта на разреждане на средата, d^{-1}

μ - специфична скорост на нарастване на биомасата, d^{-1}

k_d – специфична скорост на отмиране на биомасата, d^{-1}

X_0 – концентрация на биомасата във входящия поток, kg биомаса/kg субстрат

X_B – концентрация на биомасата в изходящия поток, kg биомаса/kg субстрат

Различието на подходите на авторите при описанието на кинетиката на ръста на бактериите се заключава в избора на факторите, влияещи на специфичната скорост на нарастването на микрофлората, които са най-значими.

2.3. Моделиране на разграждането на субстрата

В процеса на микробиологичната реакция на компонентите на субстрата, различните групи микроорганизми се разлагат до по-прости вещества. В общия вид масовия баланс на системата по i -тия компонент може да се опише по следния начин [70]:



Фиг. 1.11. Масов баланс по отношение на i -тия компонент, подложен на анаеробно разграждане

Скоростта на изменение на концентрацията на субстрата, изхождайки от уравнението на масовия баланс може да бъде описана като [49, 57, 61, 78, 83, 99, 70]:

$$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) + \left(\frac{dS}{dt}\right)_R - \left(\frac{dS}{dt}\right)_r \quad (1.10)$$

където S_0 и S са съответно концентрацията на субстрата на входа и на изхода от реактора, която се изразява чрез ХПК (COD), kg_{COD} / m^3

$\left(\frac{dS}{dt}\right)_R$ - скорост на образуване на компонента в резултат на жизнените процеси на биомасата

$\left(\frac{dS}{dt}\right)_r$ - скорост на потребление на дадения компонент на субстрата

2.4. Моделиране на образуването на продуктите на микробиологичната реакция

Отличителна черта на метановата ферментация се явява това, че за широк спектър на входни вещества, които се поддават на анаеробно разграждане, изходните продукти на метаболизма са CH_4 (60-90%), CO_2 (до 40%), H_2S (1-2%) и в незначително количество други вещества (общото съдържание на които е под 1%). Тази газова смес се нарича биогаз.

На всеки стадии на процеса на преобразуване на изходния материал в биогаз се образуват съответните продукти на реакцията, които се явяват субстрат за следващата реакция. Скоростта на образуване на продукта [99] на реакцията може да бъде изразена чрез потреблението на субстрат за обезпечаване на енергетичната потребност на клетъчната маса:

$$\frac{dP}{dt} = Y_s \left(\frac{dS}{dt}\right)_E \quad (1.12)$$

Разгледаните по-горе процеси на нарастване и развитие на биомасата, разграждането на компонентите на субстрата и образуването на продуктите на биореакциите, неразделни свързани помежду си и тяхното описание представлява модел на процесите на преобразуване на ограничената маса в биогаз. При различни условия, различни етапи на процеса са лимитиращи [91].

За уточняване на модела, различни групи изследователи разглеждат 2 до 5 стадия на процеса на метанова ферментация на органичното вещество [17, 18, 56, 57, 60, 70, 74, 75, 78, 91, 99, 109, 125].

1.7. Изводи

1. Обзорът и анализът на съществуващото положение показват, че страната е налице висок и неизползван понастоящем потенциал за оползотворяване на генерираната от земеделието и животновъдството органична маса за получаване на енергия.

2. Микроорганизмите разграждащи органичната материя са силно чувствителни към параметрите на средата като:

- температура
- алкалност
- наличие на инхибиращи вещества
- време на престой в реактора
- натоварване по органично вещество,

Които трябва да бъдат взети под внимание при моделирането на процеса на анаеробното разграждане.

3. Отделните подпроцеси на анаеробното разграждане взаимно си влияят, като изходните елементи от даден процес, могат да имат инхибиращо въздействие върху друг от процесите, което налага необходимостта от прецизно прогнозиране на преотичането на процесите и пространственото им разграничаване.

4. В инсталациите за производство на биогаз обикновено се контролира непрекъснато температурата и състава на получения биогаз. Периодично се правят по-пълни анализи на параметри на субстрата, но невъзможността за извършване на тези анализи в реално време не позволява ефективно управление на процеса при изменения в състава на субстрата.

5. От гледна точка на експлоатацията на инсталациите за получаване на биогаз, прилагането на математически модели представлява възможност за прогнозиране на работата на инсталацията при промени на процеса, например при промяна в характеристиките на субстрата, съотношението на основен субстрат и коферменти и др., с което да се предотвратят непредвидени спадове в производството на биогаз или прекъсване на процеса.

6. В литературата няма данни за използването на математически модели за прогнозиране на работата на инсталациите за биогаз в процеса на тяхната експлоатация и управление на процеса.

1.8. Цели и задачи на дисертационния труд

Цел на дисертационния труд е да се приложат модели и алгоритми, с които да се постигне оптимизиране на процесите на анаеробно разграждане в инсталациите за получаване на биогаз и да се подпомогне управлението на процесите, чрез прогнозирането им с използването на математически модели на процеса.

За постигането на основната цел се поставят следните задачи:

1. Да се направи анализ и оценка на съществуващите математически модели на процеса на анаеробно разграждане.
2. Да се подбере базов модел с достатъчно широка приложимост и точност, за да може да намери практическо приложение в управлението на процесите в реални условия, който да се адаптира към потребностите на експлоатацията на биогазовите инсталации и се реализира програмно.

3. Да се изследва експериментално, както и чрез прилагане на математическия модел, влиянието на параметрите на процеса върху получаването на биогаз.

ГЛАВА II

2. Избор на базов модел за симулиране на процеса на анаеробно разграждане

2.1. Анализ и оценка на съществуващите модели на анаеробното разграждане

Известни са множество статични и динамични модели на процесите на анаеробно разграждане, като те се различават по своята сложност, брой на входните, кинетичните и стехиометрични параметри. Ще направим обзор на съществуващите модели чрез обобщаване на техните функции и възможности и като проследим историческото им развитие през последните 40 години. В табл. 2.1 е направен сравнителен обзор на всички съществуващи модели на процесите на анаеробно разграждане.

През 2002г. настъпва преломен момент в разработването на модели на анаеробно разлагане. Предложени са два много сходни модела от Siegrist и колежив (1993, 2002) [123] и Batstone и клетив (2002) [18,19]. Моделът на Siegrist по-прост, с по-малко процеси и параметри. Той се фокусира на мезо- и термофилно разграждане на утайки от ПСОВ и цели да улови динамиката на процеса при различно хранване с утайка и различни температури на ферментация. ADM1 разработен от Batstone цели да бъде универсално приложим модел, който не само да се използва при различни температури, но и с различни видове субстрат. Разработен от IWA Task Group за математично моделиране на процеси на анаеробно разграждане, ADM1 е много комплексен модел с 22 процеса и над 50 параметъра. Независимо от това той се налага като универсален модел, приложим в много случаи и се използва най-често от всички известни модели. Много от проблемите, свързани с приложението на модела намират решение през следващите години, като се подобрява неговата универсалност. Едно от основните преимущества на ADM1 модела е въвеждането на дезинтеграцията като допълнителна стъпка преди хидролизата. Моделирана с кинетични уравнения от първа степен, дезинтеграцията описва разделянето на разградимите, неразтворими фракции на въглехидрати, протеини и липиди, което е особено важно при разграждането на сложни субстрати като енергийни култури и органични отпадъци.

Въпреки, че ADM 1 е един от най-пълните модели на анаеробно разграждане са разработени и други модели, специфични за конкретни приложения. Модела ADM 1 също е осъвършенстван. Например Keshtkar и колектив (2003) [77] включва разбъркване в реактора, използвайки класически модел на Levenspiel (1962) като валидира модела за разграждане на говежди тор, т.к. до 2003г. всички налични модели на анаеробно разграждане считат реактора за такъв с непрекъснато разбъркване, което в повечето случаи не е така, но това допускане прави модела значително опростен. Sarti и колектив (2004) [114] разработва значително опростен модел на анаеробен процес само с 9 параметъра и 8 входни променливи, като в модела се отчитат и хисродинамични характеристики. Освен това Sötemann и колектив (2005) [126] разработват модел на стационарен процес на анаеробно разграждане, за проектиране на биогаз-инсталации и определяне на оптималните параметри на инсталацията, както и по-сложен динамичен модел. Blumensaat и Keller (2005) [23] адаптират ADM1 модела в двустепенен модел с една термофилна степен за моделиране на хидролизата, ацидо- и ацетогенезата и една степен работеща при мезофилни условия за

моделиране на метаногенезата. За валидиране на модела си те използват експериментална инсталация със 160л реактор. Модела показва добри резултати, но само при нормални експлоатационни условия на инсталацията. Претоварване на инсталацията и аварии не могат да бъдат моделирани.

Наличното немалко разнообразие от модели на процеса на анаеробно разграждане, моделът ADM1 е избран да бъде използван за нуждите на настоящия дисертационен труд, поради неговото широко разпространение и наличието на много примери за неговото приложение от редица изследователи.

Могат да бъдат резюмирани основните предимства и недостатъци на метода, които обосновават избора му за по-нататъчните изследвания:

Предимства

1. Утвърден е като стандартен модел на анаеробното разграждане на утайки и органични отпадъци.

2. Механизма на модела е добре изяснен, подлежи на развитие и модифициране и може да се използва като база за разработване на модифицирани модели, които да са адаптирани към конкретните условия.

3. Може да се използва за широк спектър от субстрати, експлоатационни условия и видове реактори.

4. Множество изследователи са използвали модела за специфични задачи. Техните резултати могат да бъдат използвани за сравнение.

Недостатъци

1. Сложен е за приложение.

2. Изисква детайлно характеризирание на субстрата за да бъде правилно приложен, което е трудоемко.

3. Някои опростявания на реакциите не са адекватни.

4. Оригиналната версия на ADM1 има някои неточности в баланса на въглерода и азота.

5. Не отчита някои междинни продукти като H_2S , P и др.

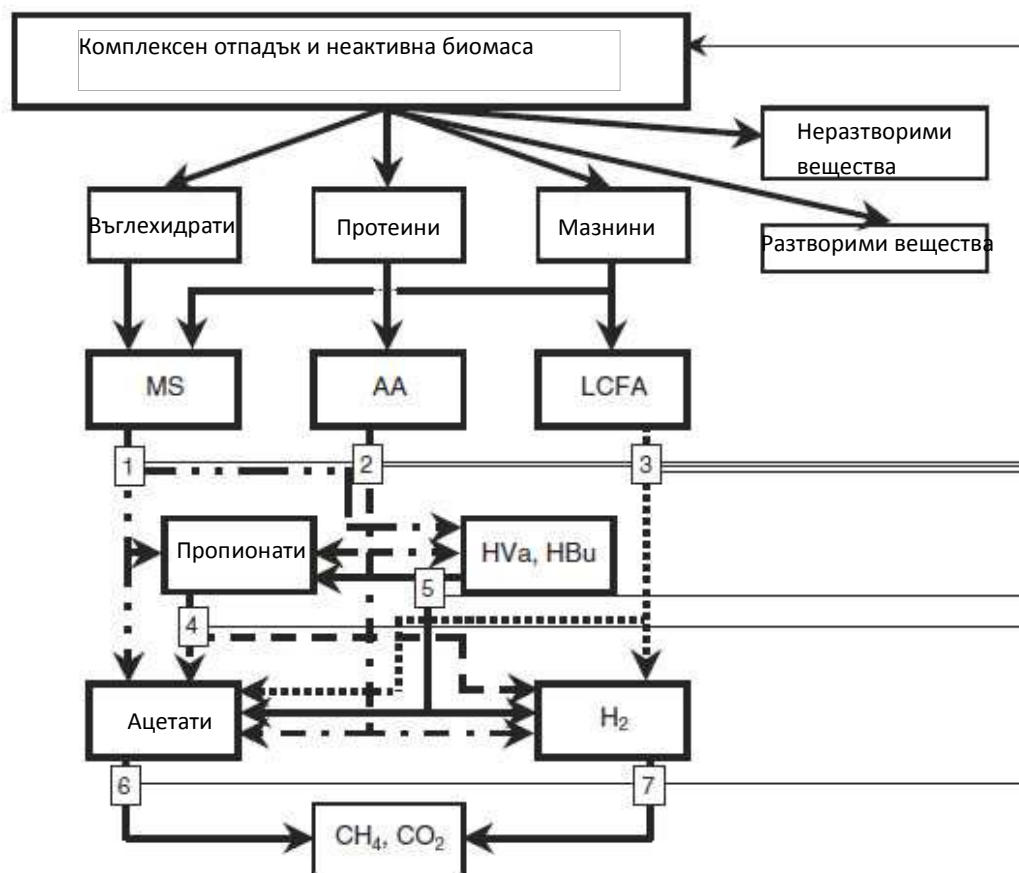
2.2. Модел на анаеробно разграждане Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (ADM1)

Моделът ADM1 е един от най-детайлните модели на процесите във ферментатора на биогазова инсталация. Повечето входни величини се задават като ХПК (kg/m^3), с изключение на азота (NH_4^+ и NH_3) и неорганичния въглерод (CO_2 и HCO_3^-), чиито концентрации се задават в $kmol/m^3$.

Най-общо процесите на анаеробно разлагане могат да бъдат разделени на три вида процеси:

- Биохимични процеси;
- Физикохимични процеси;
- Масообменни процеси между газовата и течната фаза.

На фиг. 2.1 схематично е представен модела ADM1. В следващите раздели ще бъдат разгледани основните параметри и променливи на модела на анаеробното разграждане.

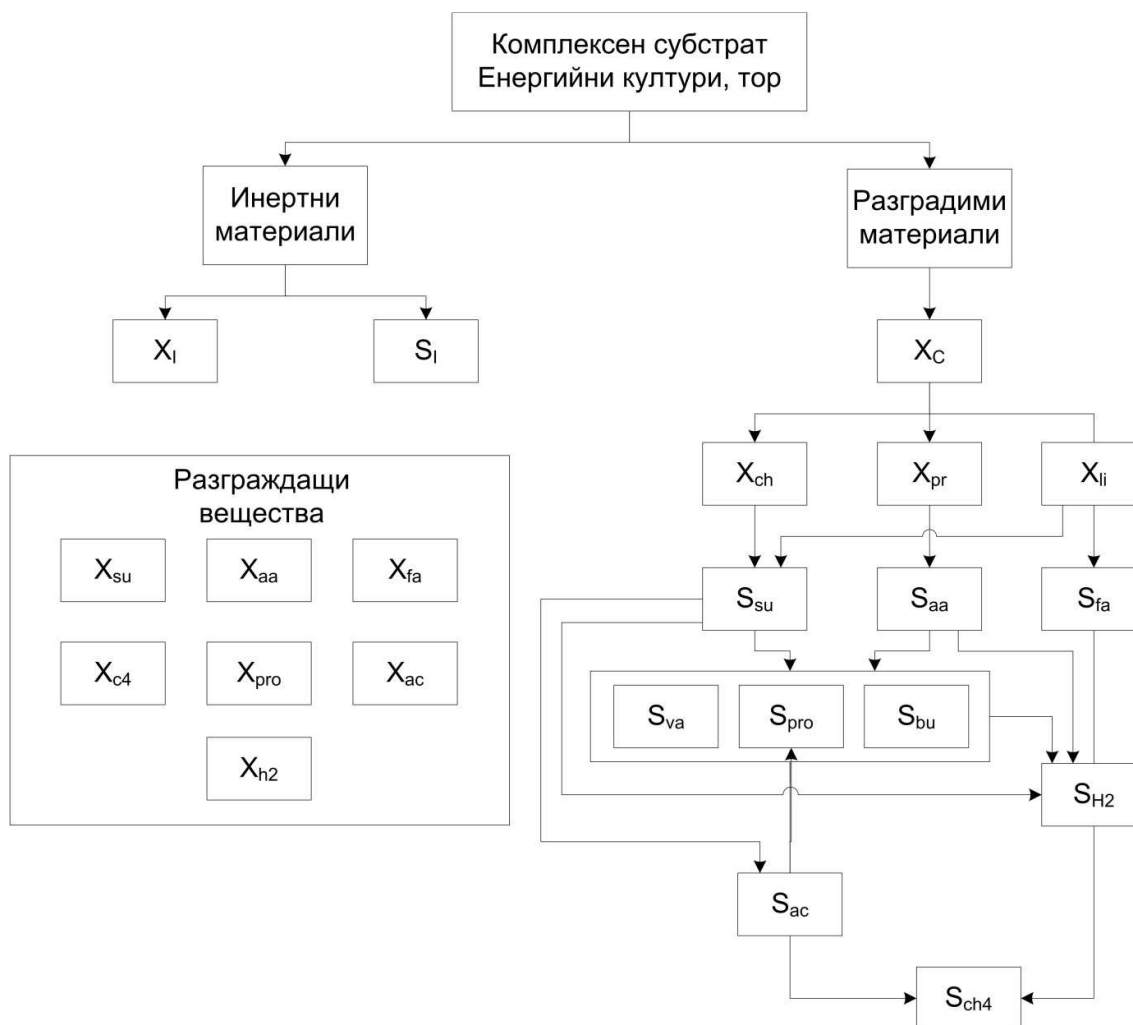


Фиг. 2.1. Модел на анаеробното разграждане: 1) Ацидогенеза от захари, 2) Ацидогенеза от аминокиселини, 3) Ацетогенеза от дълговерижни мастни киселини, 4) Ацетогенеза от пропионати, 5) Ацетогенеза от бутирати и валерати, 6) Ацетокласна метаногенеза, 7) водородотрофна метаногенеза

2.2.1. ADM1 променливи на състоянието

Състоянието в реактора в модел ADM1 се задава посредством 24 променливи, които могат да бъдат разделени в две основни групи разтворими и неразтворими съединения, обозначени съответно с S и X. Тези две групи в последствие се разделят на две групи - инертни компоненти, изразени чрез S_I и X_I и разградими компоненти. Разградимите разтворими компоненти се състоят от органични и неорганични съставки, като неразтворимите съставки отделно от X_I се считат за органични, т.к. неорганичните компоненти са част от X_I .

На фиг. 2.1 е показано изменението на ХПК през различните стадии на анаеробното разграждане.



Фиг. 2.1 Схема на ADM1 модела на процеса на анаеробно разграждане с използване на COD базирани променливи

В първа стъпка субстрата се разделя на инертна и разградима съставляваща, като разградимата част се разгражда на въглехидрати, протеини и липиди. След това става разграждане до захари, аминокиселини и дълги мастни киселини, преди те да бъдат трансформирани до водород и органични киселини, от които се образува метан. Различните популации бактерии, чрез които се извършват тези трансформации са налични също и в неразтворимите фракции.

2.2.2. Біохімічні процеси

Моделът ADM1 се състои от 19 биохимични процеса, описващи основните 5 процеса на разлагане при анаеробното разграждане.

- 1) Дезинтеграция (разлагане)
- 2) Хидролиза
- 3) Ацидогенеза
- 4) Ацетогенеза
- 5) Метаногенеза

Дезинтеграцията и хидролизата са извънклетъчни процеси, докато останалите три процеса са вътрешноклетъчни. Както се описва от Batstone (2002) [18, 19], извънклетъчните процеси се описват с помощта на химичната кинетика с уравнения от първа степен, а вътрешноклетъчните с уравнения на Monod, с които се описва издигането на субстрата развитието на бактериите и гниенето. Освен това вътрешноклетъчната кинетика на биохимичните процеси се повлията и от инхибитори. Общо пет функции на инхибиране са моделирани в ADM1 – две функции моделиращи инхибирането на рН и три функции моделиращи инхибирането на амоняк, бутирати и валерати.

2.2.3. Физико-химични процеси

Следващия вид уравнения в ADM1 описват физико-химичните процеси. В модела ADM1 са въведени два основни вида физико-химични реакции:

- 1) Процеси течна фаза-течна фаза (основно киселинно-алкални реакции)
- 2) Процеси течна фаза-газова фаза (трансфер от течна в газова фаза на компонентите на биогаза).

2.2.4. Киселинно-алкални реакции

Един от основните процеси течна фаза-течна фаза е киселинно-алкалното равновесие. Посредством йонна асоциация и дисоциация с водородни (H^+) и хидроксилни (OH^-) йони киселинно-алкалните двойки реагират помежду стремежки се към равновесие. Силата на тези реакции се определя от дисоциационните константи K_a за всяка киселинно-алкална двойка. Големи стойности на дисоциационните константи се свързват със слаби киселини, при които степента на дисоциация е малка, а докато малките стойности на дисоциационните константи отговарят на силните киселини, при които дисоциацията е почти пълна.

Стойностите на дисоциационните константи освен това са силни температурно зависими, което обуславя необходимостта от температурна компенсация. В модела ADM1 тя е осигурена за киселинно-алкалните двойки CO_2/HCO_3^- и NH_4^+/NH_3 . При органичните киселини, стойностите на дисоциационните константи остават почти константни в температураурния диапазон на работа на био-газовите инсталации (273-333K) и не се налага температурна компенсация.

2.2.5. Масообмен течност-газ

Трансфера течност-газ е важен за моделиране на потока биогаз, получаван при анаеробното разграждане, както и на концентрациите на газовите компоненти в течната и газовата фаза. В използвания модел ADM1 се вземат под внимание три основни газови компоненти на биогаза: H_2 , CO_2 и CH_4 . Трансфера на NH_3 и H_2S не се вземат под внимание при ADM1. В частност получаването на H_2S не се моделира, т.к десулфуризацията не е включена в биохимичните процеси. Все пак дисоциацията на H_2S е силен инхибитор в течната фаза при анаеробното разграждане и освен това предизвиква проблеми за когенерацията. Независимо от това на практика това не е от значение при моделирането на процесите в био-газовите инсталации, т.к образуването на H_2S обикновено се контролира чрез подаване на сгъстен въздух в течната фаза.

Трансфера на газ между течната фаза и газовата фаза основно зависи от концентрацията на газ в течната фаза ($S_{liq,i}$) и съответното парциално налягане в газовата фаза ($p_{gas,i}$). Съгласно закона на Хенри равновесието между двете фази се постига при:

$$K_H p_{gas,i} - S_{liq,i} = 0 \quad (2.1)$$

Порди факта, че в ADM1 променливите на състоянието са базирани на ХПК, константата на Хенри K_H трябва да бъде коригирана с коефициент 16 за H_2 и 64 за CO_2 .

2.3. Калибриране на модела

Правилното калибриране на модела е необходимо за да осигури валидни резултати от поведените изследвания. При калибрирането на модела трябва да се вземат под внимание два аспекта:

- Характеристиките на субстрата;
- Определянето на кинетичните параметри на модела.

2.3.1. Характеризиране на субстрата

Характеризирането на субстрата за ADM1 изисква определянето на разградимите и неразградими ХПК фракции, описани на фиг. 2.1 и табл. 2.2. За съжаление измерването на общия ХПК е трудно. От една страна измерването на ХПК в реално време е скъпо и неточно, поради високото съдържание на сухо вещество, а от друга страна лабораторния анализ изисква добро хомогенизиране на пробата за да се получат представителни резултати. Необходими са алтернативни методи, които позволяват пресмятането на общия ХПК и неговата разградима и неразградима фракция, базирани на стандартни аналитични параметри на субстрата. Подобен алтернативен метод е предствен от Koch et al. (2009) [81], който определя ThCOD базирайки се на разширен Weender анализ (Basler 1976). Weender анализа анализира разгрдимата и неразградимата фракции на летливите твърди вещества, като ги разделя на чист протеин (RP), чисти липиди (RL) и въглехидрати, състоящи се от сурови фибри (RF), и свободни от азот екстракти (NfE). Въглехидратите след това се подразделят на скорбяла, която се пресмята като въглехидратите минус натурални детергентни фибри (NDF), целулоза ,състояща се от киселинни детергентни фибри минус киселинен детергентен лигнин (ADL), както и хемицелулоза (NDF-ADF) и лигнин (ADL).

2.3.2. Определяне на кинетичните характеристики на модела

Поради многото параметри на ADM1 модела, тяхното определяне е сложно и изискван много време. Освен това наличието на някои променливи, към които модела е особено чувствителен усложнява допълнително проблема. Подходът, разработен от Wichern et al. (2009) [151] предлага алтернативен подход на сложното определяне на всички параметри на модела. Резултатите от анализа на чувствителността на модела по отношение на различните параметри показва, че това са: скоростта на дезинтегация k_{dis} , параметрите на хидролизата $k_{hyd,pr}$, $k_{hyd,li}$ и $k_{hyd,ch}$, максималната скоростта на образуване на пропионатни ацетогени $k_{m,pro}$ и ацетокласни метаногени $k_{m,ac}$. Тези параметри биват оптимизирани при калибрирането на модела.

ГЛАВА III

3. Прилагане на модела Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (ADM1) за симулиране и прогнозиране на процесите в биогазова инсталация

3.1. Реализиране и тестване на модела

Една от целите на настоящия дисертационен труд е разработването на математичен модел процеса на анаеробно разграждане, който да бъде използван за прогнозиране и съответно управление на процеса в инсталацията. За база ще бъде използван модела на IWA Task Group, Anaerobic Digestion Model Nr.1 (ADM1), който както бе изложено във втора глава на настоящата дисертационна работа, има най-широка приложимост за различни видове субстрати, отчита инхибирането и описва процеса с голям брой променливи.

Моделът на биогазовата инсталация е синтезиран в средата на MathCAD. MathCAD е софтуер предназначен за математически изчисления и графично визуализиране на резултатите. Основно предимство на програмата, поради която тя е избрана за реализиране на модела в настоящата дисертация е, че тя притежава сравнително прост и същевременно интерактивен интерфейс. Поради това програмата се използва широко в инженерните пресмятания от специалисти, които не са програмисти, за разлика от други софтуери за математически пресмятания като Mathlab, Maple които макар и по-съвършени и приложими за реализиране на сложни модели (каквото е ADM 1), са значително по-сложни за работа. В анализираната литература в литературния обзор, няма данни за използването на MathCAD за прилагане на модела ADM1. Това, както и сложността и големия брой диференциални уравнения на модела ADM 1, налага да се оцени способността на заложените в MathCAD алгоритми да дадат адекватно решение на уравненията.

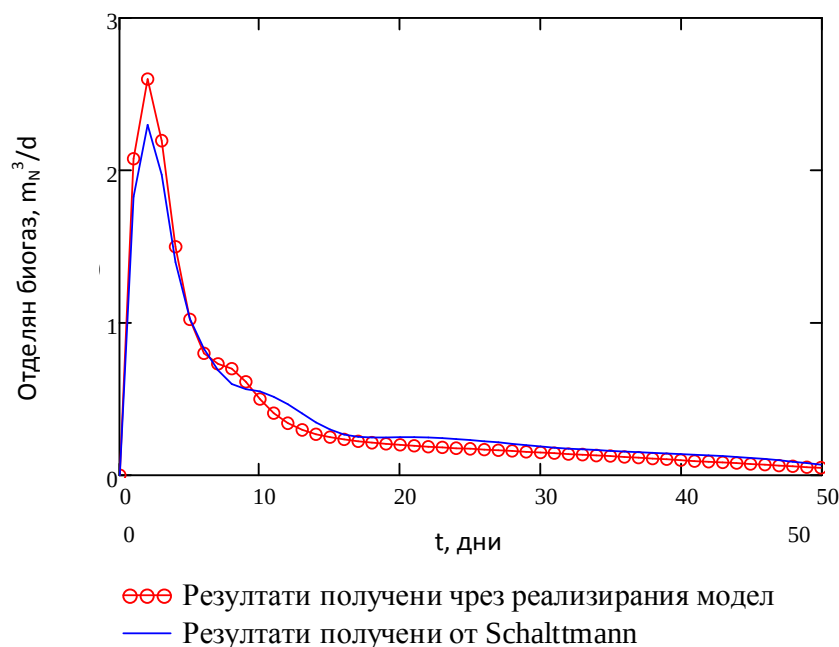
Решението на диференциалните уравнения, моделиращи процеса на анаеробно разграждане се извършва посредством вградената функция на MathCAD, Odesolve.

Кинетичните параметри на модела са определени по литературни данни [78, 80].

За първоначална оценка на адекватността на реализирания програмно модел и способността на използвания в MathCAD алгоритъм да даде адекватно решение на уравненията на модела, е проведена симулация, целяща да се получат сходни резултати с тези получени от други автори, при прилагане на модела ADM1. Като референтни са използвани резултати, получени от Shalttmann [116] за разграждане на говежди екскременти с ко-фермент царевичен силаж. Изборът на резултати на този автор за референтни се обосновава с подробното представяне на входните параметри и резултатите, което предоставя възможност за добра повтораемост на резултатите.

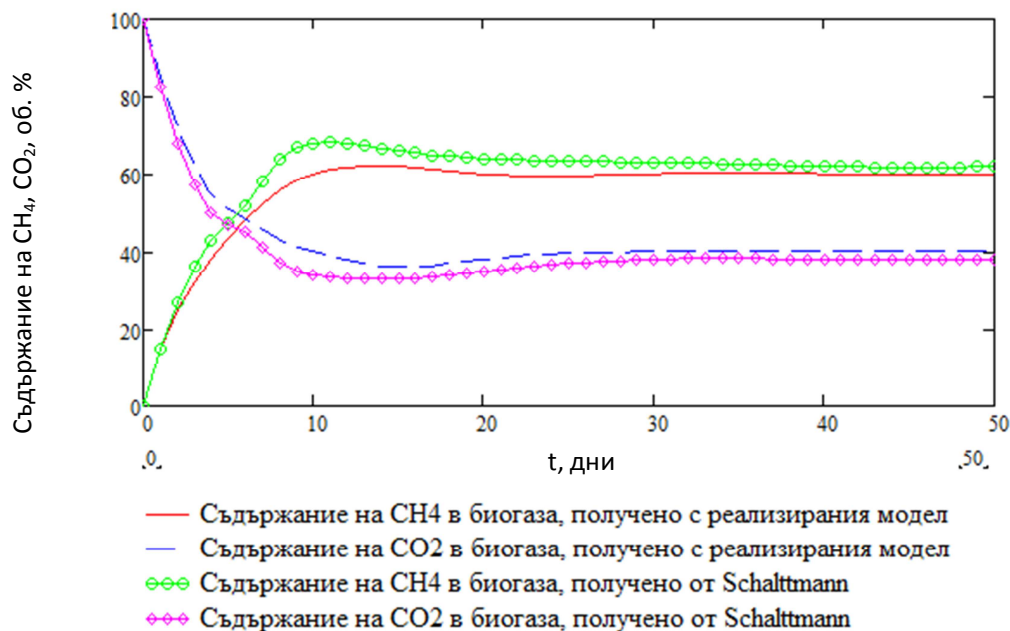
Симулиран е процеса в 36l реактор при мезофилни условия ($t=38^{\circ}\text{C}$) при време на престой 50 дни.

На фиг. 3.1 е представено сравнение на резултатите, получени от автора на настоящия дисертационен труд чрез реализирания програмно модел и референтните стойности.



Фиг. 3.1. Изменение на количество на отделяния биогаз, определено с приложения модел ($Bgy(t)$) и сравнено с резултатите, получени от Schaltmann ($Bgy_s(t)$), L_N/d

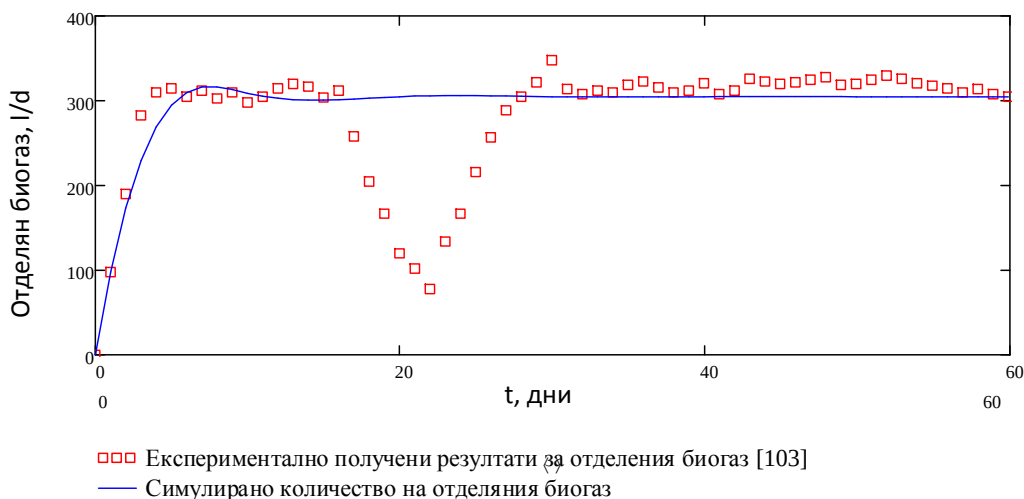
На фиг. 3.2 е представено сравнение на съдържанието на CO_2 и CH_4 , получени с разработения модел и тези използвани като референтни.



Фиг. 3.2 Сравнение на изменението във времето на съдържанието на CO_2 и CH_4 , получено с приложения модел ($CH_4(t)$, $CO_2(t)$) и тези получени от Schaltmann ($CH_4(t)_s$, $CO_2(t)_s$), об. %

Резултатите получени с разработения модел имат добра степен на съвпадение с референтните стойности. Разликата между двете симулации най-вероятно се дължи на известни разлики в кинетичните параметри между двата модела, т.к. за симулациите реализирани от Schaltmann не са налице данни за всички коефициенти.

Втората симулация, целяща проверка на адекватността на разработения модел се базира на експериментални данни. В този случай за референтни стойности се използват експериментални данни за анаеробно разграждане на хранителни отпадъци [103]. Резултатите от симулацията, сравнени с данните за отделения от процеса биогаз са представени на Фиг. 3.3.



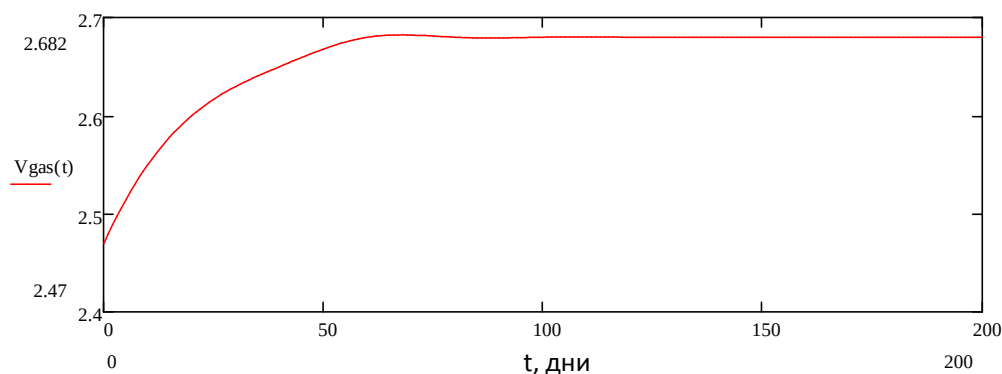
Фиг. 3.3. Сравнение на експериментално получени резултати за количеството на получения биогаз и симулирани резултати с реализирания в MathCAD модел, L/d

Както се вижда на фиг. 3.3 при експерименталното изследване след 18-тия до 30-я ден на разграждането се наблюдава спад в производството на биогаз, дължащ се на увеличеното съдържание на летливи мастни киселини и съответния спад на рН. Този процес не се моделира от базовия ADM1 модел.

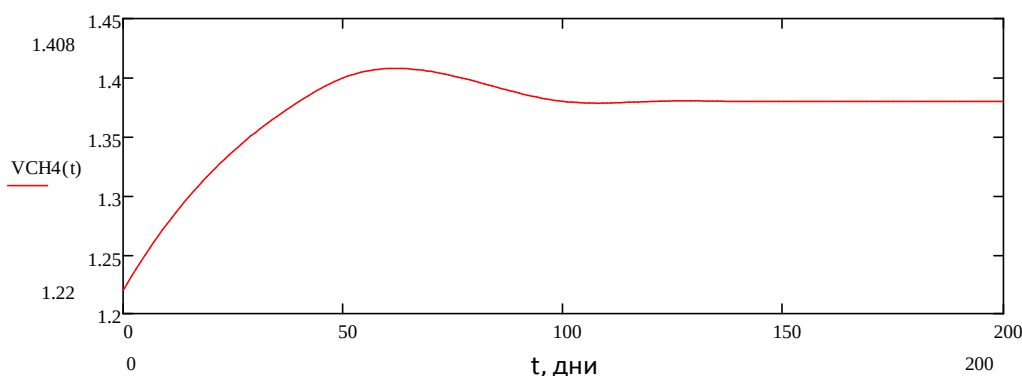
След като установихме, че спада в производството на биогаз не се симулира от базовия ADM1 модел е необходимо да проследим изменението на концентрацията на отделните компоненти на субстрата и биогаза, за да установим дали е възможно все пак да се съди по вторични признаци за наблюдаваното експериментално прекъсване на процеса. За целта е направена симулация на изменението на:

- Състава на биогаза – съдържание на CH_4 и CO_2 ;
- Съдържанието на летливи мастни киселини, бутрати, валерати, пропионова киселина, оцетна киселина, летливи мастни киселини;
- рН в реактора.

Резултатите от симулациите са представени на фиг. 3.4 до 3.13.



Фиг. 3.4 Симулирано количество на получения биогаз в $\text{m}^3/\text{m}^3\text{d}$, получено с реализирания модел



Фиг. 3.5 Симулирано количество на съдържанието на метан в получения биогаз в $\text{m}^3/\text{m}^3\text{d}$, получено с реализирания модел

Проведените симулации дават възможност за надеждно прогнозиране на работата на биогазовата инсталация в реални условия. Въпреки, че някои специфични проблеми при експлоатацията, свързани напр. с инхибирането в резултат на понижено рН на средата не се моделират директно, т.е. модела не симулира намаляването на отделяния биогаз, все пак за тези процеси могат да бъдат прогнозирани на база на повишеното съдържание на летливи мастни киселини, чието съдържание модела симулира адекватно.

3.2. Изследване на влиянието на флуктуациите на температурата върху производството на биогаз, посредством реализирания модел

При контрола на процеса в една биогазова инсталация, обикновено в реално време се измерва и поддържа температурата в реактора. Затова е важно на етапа на проектиране на инсталацията да се зададат допустимите граници на изменение на температурата, която след това се регулира автоматично. С помощта на разработения модел е симулирано влиянието на температурата в реактора, върху процеса и по специално върху дебита на отделяния биогаз.

Известно е, че процеса на анаеробно разграждане е чувствителен към температурата поддържана в реактора. Обикновено при експлоатацията на инсталацията се допуска колебание на температурата в рамките на 2-3 градуса. Температурата е един от основните

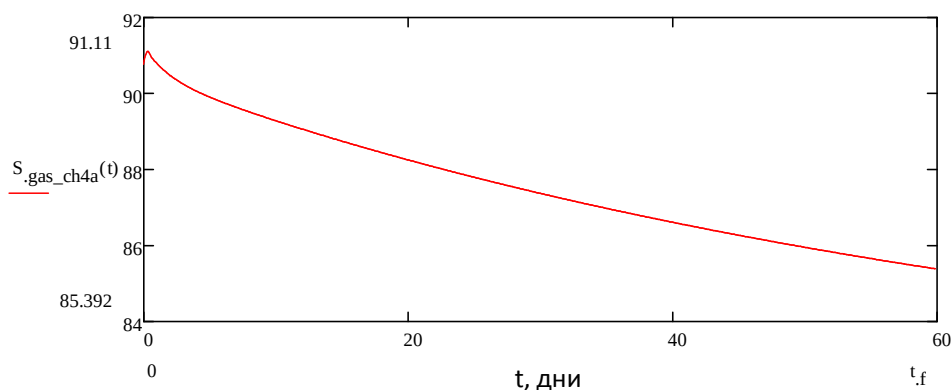
параметри, подлежащ на контрол по време на процеса, т.к освен нейното значение е и един от малкото параметри, които могат да бъдат измервани в реално време.

Температурата има значително въздействие на стационарния процес на образуване на биогаз, по литературни данни [22] 1,6% на градус при 30-35°C и 3,4% при 25-30°C.

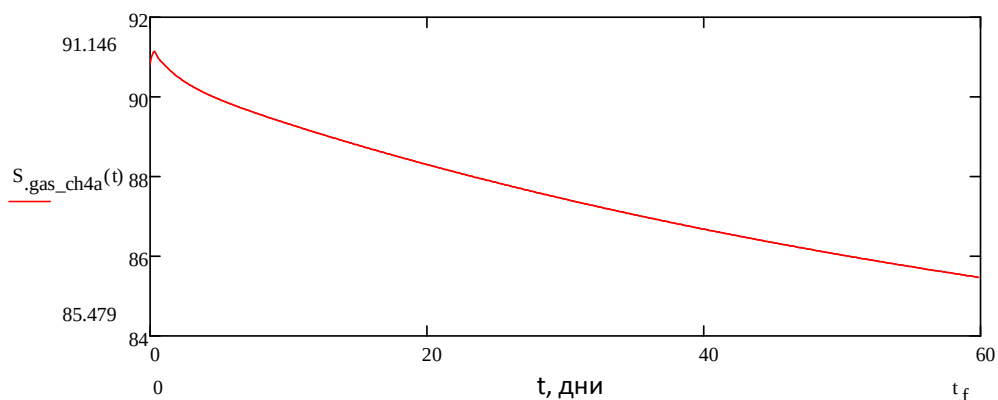
Чрез тестовия модел е изследвано влиянието на изменението на температурата в границите на допустимото за процеса. Приемат се следните условия:

- Мезофилен процес със средна температура 42 °C
- Допустим толеранс – 40-44 °C

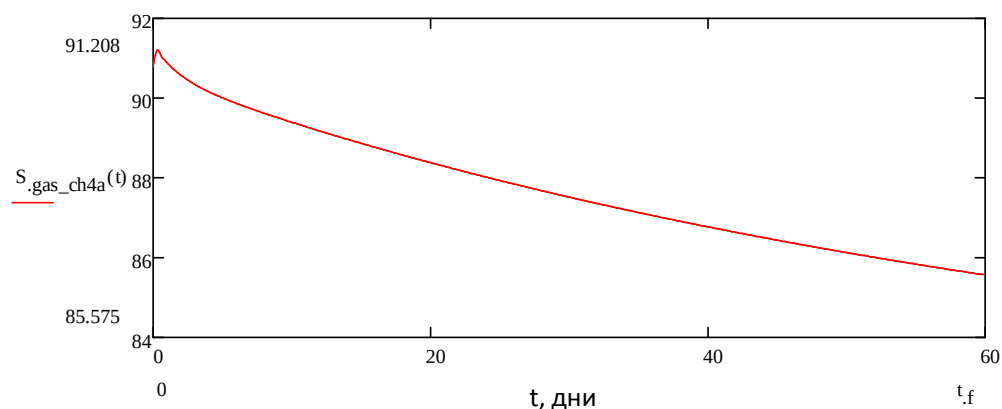
Направени са симулации при трите температури, като в единия случай са използвани константни стойности на кинетичните параметри, така както се предлагат в базовия модел на Batstone [18], а в другия случай е отчетена температурната зависимост на кинетичните параметри. Резултатите от симулациите са представени на фиг. 3.14 до 3.18.



Фиг. 3.14 Изменение на дебита на метана във времето при $t=40^{\circ}\text{C}$, kgCOD/m^3 , получено с реализирания модел



Фиг. 3.15 Изменение на дебита на метана във времето при $t=41^{\circ}\text{C}$, kgCOD/m^3 , получено с реализирания модел

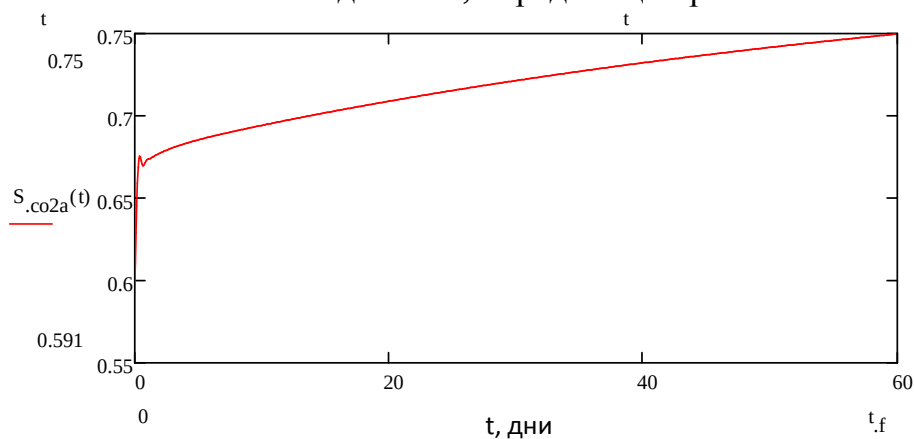


Фиг. 3.16 Изменение на дебита на метана във времето при $t=42^{\circ}\text{C}$, kgCOD/m^3 , получено с реализирания модел

Както се вижда от фиг. 3.14 до фиг. 3.21 влиянието на температурата върху процентното съдържание на метан в получения биогаз е под 2% в края на процеса. Това се потвърждава и от експерименталните резултати и литературните данни. Следователно модела има добра достоверност по отношение на моделирането на температурната зависимост на състава на получения биогаз. Температурата оказва влияние основно върху стабилността на процеса и развитието на микробната популация.

3.3. Симулиране на състава на получения биогаз и компонентите на субстрата, посредством реализирания модел

С реализирания от нас в MathCAD модел може да бъде симулиран състава на получения биогаз. На фиг. 3.22 е дадено изменението на съдържанието на CO_2 в получения биогаз. На фиг. 3.22 до фиг. 3.32 е проследено изменението на съдържанието на основните съединения, определящи протичането на процеса.



Фиг. 3.22 Изменение на съдържанието на CO_2 в биогаза във времето при $t=40^{\circ}\text{C}$, kgCOD/m^3 , получено с реализирания модел

ГЛАВА IV

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИЗСЛЕДВАНЕ И МОДЕЛИРАНЕ НА АНАЕРОБНОТО РАЗГРАЖДАНЕ НА ПТИЧИ ТОР

В настоящата глава е разгледан проблема за оползотворяване на отпадъците от птицефермите в инсталации за получаване на биогаз. Птичите екскременти като субстрат за анаеробното разграждане са избрани поради факта, че от една страна птицевъдството е добре развито в България, което обуславя наличието на голямо количество отпадъци, подлежащи на оползотворяване, а от друга страна не е наличен достатъчен практически опит от използването на птичи екскременти в инсталациите за биогаз. Това, заедно с някои специфични проблеми при анаеробното разграждане на птичи екскременти налага експерименталното изследване на процеса, за да се определят основните параметри, при които може да се осигури стабилен процес, както и да се определят изходните условия за симулиране на работата в инсталацията с реализирания в предходната глава модел. Въз основа на резултатите от експерименталното изследване за предложени основни параметри на типова инсталация за получаване на биогаз от птичи екскременти с приложимост в птицефермите в страната. Реализирана е идеята за прилагане на модел на процеса на анаеробно разграждане на етапа на проектиране на инсталацията, с цел прогнозиране на нейната работа, като е приложен реализирания в настоящата дисертация модел ADM1 в средата на програмния продукт за инженерни пресмятания MathCAD.

4.1. Специфични особености на птичия тор като суровина за анаеробно разграждане

Птицевъдството е високо автоматизирано интензивно, характеризиращо се с висока плътност на птиците. Липсата на добро управление на отпадъците от птицефермите в райони с големи птицеферми може да доведе до проблеми свързани с околната среда и здравето на живеещите в района [Demireg & Chen, 2008] [38]. Нарастналият брой на птицефермите в малки населени места налага прилагането на технологии за третиране на тези отпадъци на малка територия.

Понастоящем отпадъците от птицефермите се управляват по един от следните начини [160]:

- Употреба в на птичия тор за наторяване;
- Компостиране;
- Изгаряне.

Изгарянето има предимството, че води до обеззаразяване на отпадъка в много висока степен, но е свързано с отделянето на парникови газове, диоксини и фурани, което го прави не предпочитан метод за третиране от екологична гледна точка.

Компостирането е процес на аеробно разграждане, който също е свързан с отделянето на парникови газове, фосфати и други емисии във въздуха, водите и почвата. Освен това отделянето на летливи азотни съединения по време на компостирането води до намаляване на съдържанието на азот в компоста, което намалява неговата ефективност при използването му за наторяване.

Анаеробното разграждане има предимства пред изброените методи за третиране на отпадъците, т.к. отделяните емисии във въздуха, водите и почвите са значително по-ниски. В същото време обаче птичия тор поставя редица проблеми при поддържане на процеса на анаеробно разграждане.

Анаеробното разграждане на птичите екскременти се разглежда от Европейската комисия като една от най-добрите налични технологии за преработване на отпадъците при интензивното отглеждане на птици [160].

Птичия тор има висок енергиен потенциал, но е проблематичен за използване при анаеробно разграждане, затова се прилага значително по-рядко от това на говежди и свински тор. Известни са редица изследвания на анаеробното разграждане на птичи тор ((Demirci and Demirer, 2004; Liu et al., 2012) [38, 90]. Все пак литературните източници относно анаеробното разграждане на птичи тор (Abouelenien et al., 2009a,b; Abouelenien et al., 2010; Anozie et al., 2005; Bujoczek et al., 2000; Callaghan et al., 2002; Fantozzi & Buratti, 2009; Fierro et al., 2014; Magbanua et al., 2001; Maibaum & Kuehn, 1999; Misi & Forster, 2001; Safley et al., 1987; Salminen & Rintala, 2002; Steinberger & Shih, 1987; Webb & Hawkes, 1985; Yaldiz et al., 2011) [7, 8, 14, 28, 31, 45, 93, 94, 98, 111, 113, 129, 143, 513] са значително по-малко, отколкото тези в които се изучава разграждането на други видове тор. В таблица 4.1 е направен обзор на изследванията на анаеробното разграждане на птичи тор от различни автори, като някои от тях изследват самостоятелното му разграждане, но повечето изследват разграждането му в присъствието на коферменти. Липсата на достатъчно информация относно анаеробното разграждане на птичи тор се дължи на рядкото използване на птичия тор в биогазовите инсталации.

Високото съдържание на азот в птичия тор, сравнено с другите видове животински тор, го прави труден за използване при анаеробното разграждане (Bujoczek et al., 2000) [28], поради неговия инхибиращ ефект.

На база на проведените до момента изследвания на анаеробното разграждане на птичи тор, могат да се определят типичните граници на основните параметри на процеса. Количеството на получения биогаз е в границите 0.120 до 0.548 m³CH₄/kg VS [Fantozzi & Buratti, 2009; Bujoczek et al., 2010] [45, 28]. Широкия диапазон на измерените стойности на получения метан се дължи на различните условия, при които са получени. Най-често получения метан е в границите 0.2 до 0.3 m³CH₄/kg VS.

Всички разглеждани изследвания използват течен субстрат, с изключение на [Fierro et al., 2013] [47], който използва сух субстрат. Отделения метан в този случай е 0.057 m³CH₄/kg VS и е значително по-малко отколкото при използването на течен субстрат.

Като най-лесен начин за предотвратяване на амонието инхибиране, е да се намали общото съдържание на азот в субстрата. Това може да се постигне като се разрежи субстрата с вода преди разграждането му.

Конвенционалните технологии за анаеробно разграждане не са подходящи за разграждане на птичи тор. Основни цели на настоящото изследване е:

- Да се изследва анаеробното разграждане на птичи тор и влиянието на параметри на процеса: дял на сухото вещество, температура;
- Да се идентифицират основните проблеми пред приложението на биогазови инсталации към птицевъдни ферми;

- Да се идентифицират възможни решения на проблемите с анаеробното разграждане на птичи тор, като се използва технология SSAD

4.2. Проблеми при процеса на анаеробно разграждане на птичи тор

Основните проблеми, поради които птичия тор рядко се използва за анаеробно разграждане са:

- Нехомогенност на субстрата;
- Високо съдържание на сухо вещество;
- Инхибиране на метаногенезата поради високо съдържание на азот/амоняк.

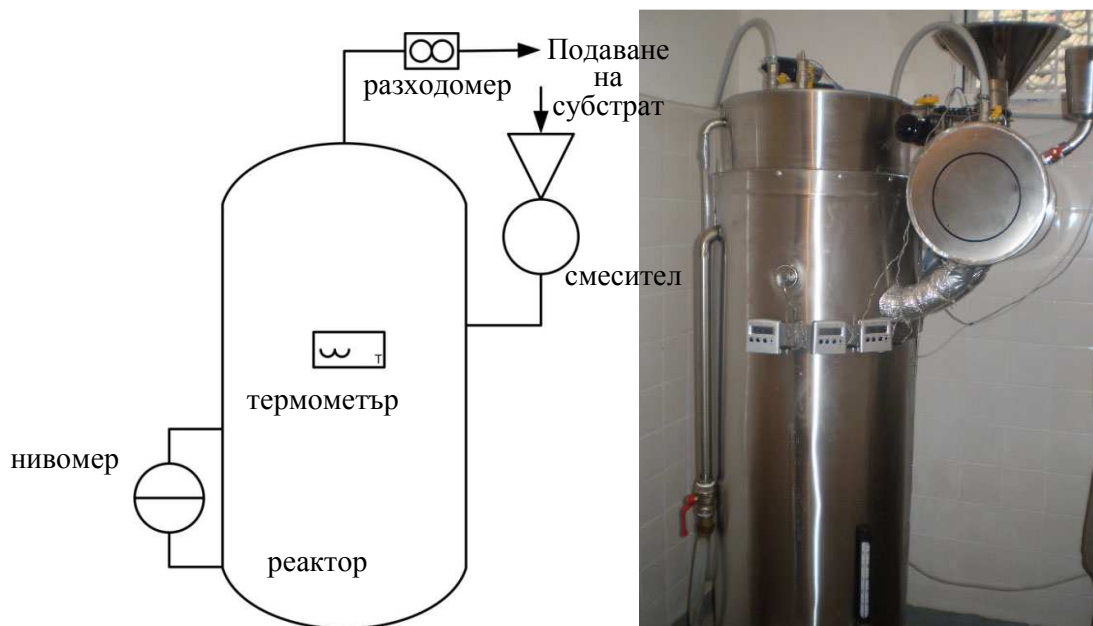
4.3. Изследване на анаеробното разграждане на птичи тор в експериментален реактор

Сухото анаеробно разграждане обикновено протича при съдържание на органично вещество над 15% и е алтернатива на традиционното анаеробно разграждане като икономически изгодна алтернатива и решение на гореизброените проблеми.

Традиционния процес изисква течен субстрат, със съдържание на сухо вещество под 10%. Говеждия тор, утайките от пречистване на отпадъчни води и хранителните отпадъци могат да бъдат подлагани ефективно на анаеробно разграждане по традиционния метод, като не изискват или изискват малко разреждане.

В настоящата дисертационна работа е направено изследване на влиянието на съдържанието на влага в субстрата и на температурата върху количеството на получения биогаз. Субстрата е получен от птицевъдна ферма в село Кралево. Експеримента е проведен в реактор с обем 240l с периодично разбъркване. Процеса е мезофилен, при температура 37°C.

Експерименталните изследвания се провеждат в реактора, показан на фиг. 4.1.

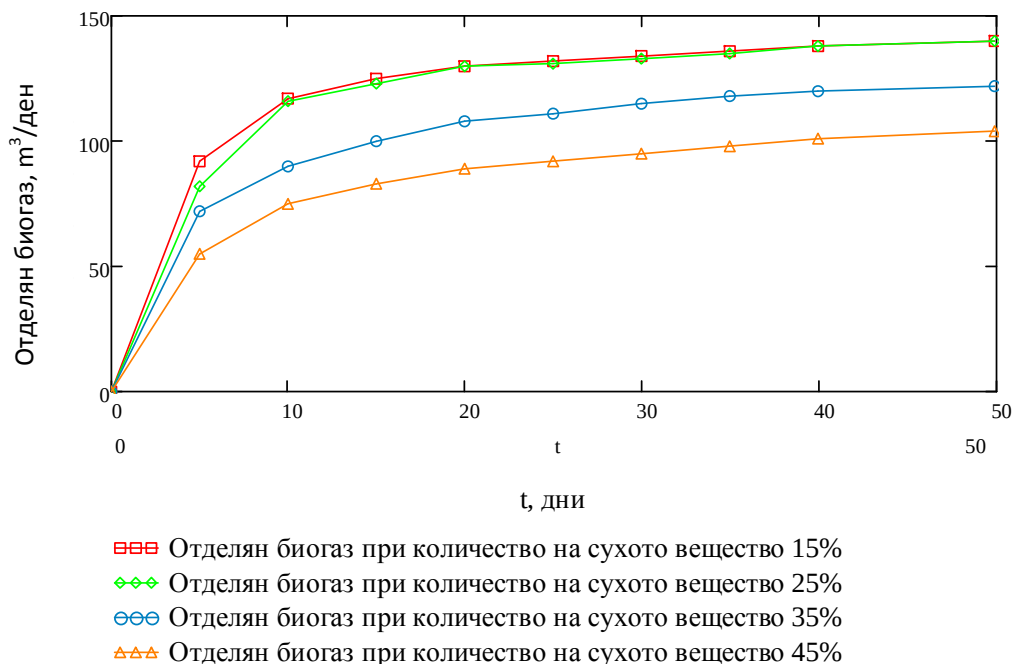


Фиг. 4.1 Експериментален реактор

Органичното натоварване на реактора се изменя от 2.2 до 3.9 gTS/l.d. Ежедневно е измервано количеството на произведения биогаз и рН. В началото на процеса, птичия тор се разрежда с вода, с цел да се ограничи концентрацията на азот. След установяването на процеса във ферментатора, отработения субстрат, който се извежда от реактора и се смесва с пресния птичи тор, с който се подава на входа. При това се постига стабилна стойност на рН на субстрата.

Органичното натоварване на реактора се изменя от 2.2 до 3.9 gTS/l.d. Ежедневно е измервано количеството на произведения биогаз и рН. В началото на процеса, птичия тор се разрежда с вода, с цел да се ограничи концентрацията на азот. След установяването на процеса във ферментатора, отработения субстрат, който се извежда от реактора и се смесва с пресния птичи тор, с който се подава на входа. При това се постига стабилна стойност на рН на субстрата.

Първоначално е проведено изследване на влиянието на съдържанието на влага в субстрата при три стойности на процентното съдържание на сухо вещество – 15%, 25%, 35%, 45%. Експеримента се провежда в продължение на 60 дни. На фиг. 3.2 е показано изменението на количеството на получения биогаз във времето при трите различни стойности на съдържанието на сухо вещество.



Фиг. 4.2 Изменение на количеството на получения биогаз във времето (t=0 до 50 дни) при различни стойности на съдържанието на сухо вещество

Резултатите на фиг. 4.2 показват повишено отделяне на биогаз при ниски стойности на дела на сухото вещество, което показва, че разреждането на субстрата повишава отделянето на биогаз. Сравнението на количеството на отделения биогаз при 15% сухо вещество и 45% показва значителна разлика в количеството на получения биогаз. Това е очаквано, т.к. недостига на вода може да води до инхибиране на хидролизата. В същото време почти няма разлика между получения биогаз при 15% и 25% сухо вещество. Това показва, че

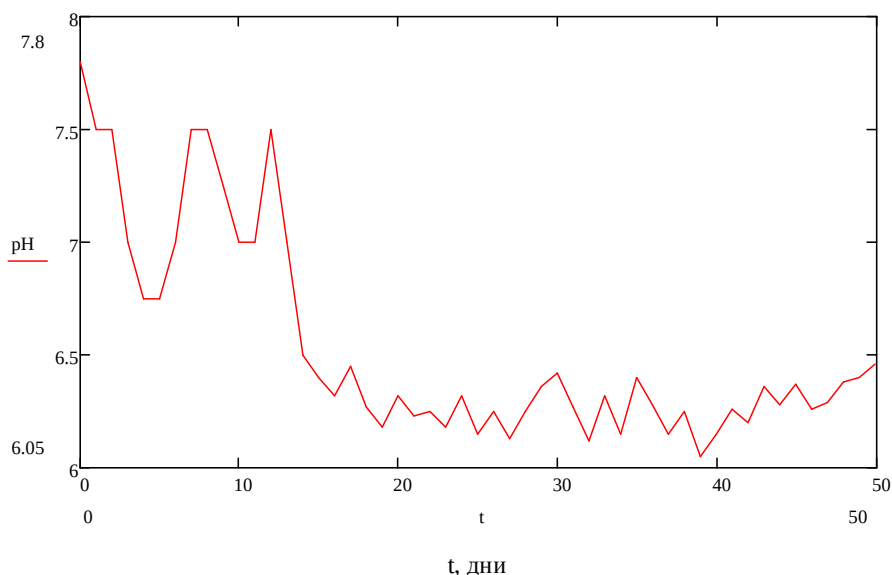
допълнителното разреждане на субстрата под 25% има пренебрежимо малко влияние върху ефективността на процеса.

Различната степен на разреждане на субстрата води до различно рН на средата при четирите опита (Таблица 4.3)

Таблица 4.3

Сухо вещество, %	рН
45	7.12
35	7.19
25	6.44
15	6.46

Ежедневно е измервано рН на субстрата. На фиг. 4.3 е дадено изменението на рН на субстрата в течение на времето, при експеримента, проведен със събстрат със съдържание на сухо вещество 15%.

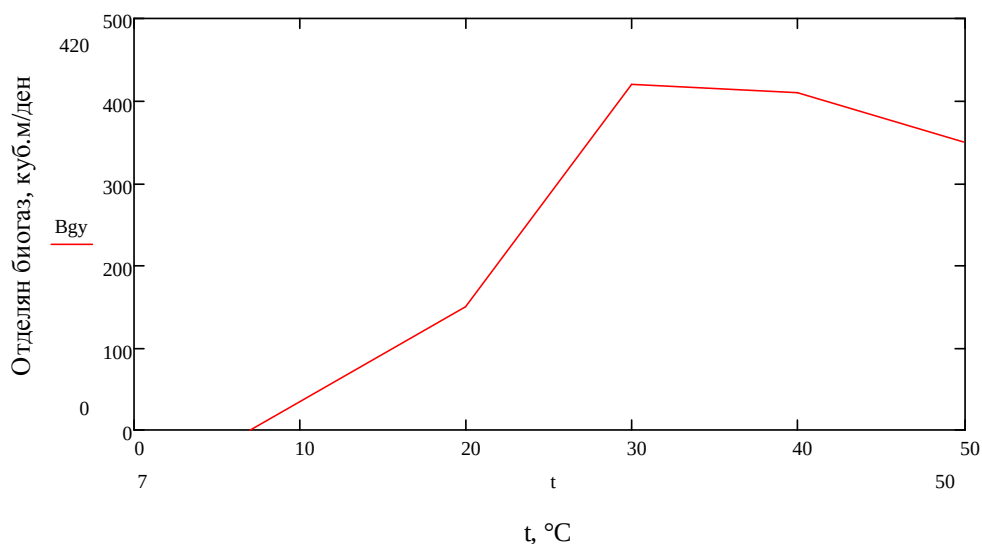


Фиг. 4.3. Изменение на рН във времето (t=0 до 50 дни) при съдържание на сухо вещество 15%

Изследвано е и влиянието на температурата върху количеството на отделения биогаз. Изследванията са проведени в същия реактор, като са направени четири експеримента – при температури 20, 30, 40 и 50°C.

Резултатите от изследването са представени на фиг. 4.4. При температура под 30°C се наблюдава рязко спадане на количеството на отделения биогаз. Оптималната температура на анаеробно разграждане е около 40°C. Въпреки, че при температура 30°C има малко по-високо производство на биогаз, поддържането на процеса при тези условия не е препоръчително, т.к. при малък спад на температурата се наблюдава рязък спад в

производството на биогаз. Обикновено точността на поддържане на температурата в инсталациите за производство на биогаз е $\pm 2^{\circ}\text{C}$.



Фиг. 4.4 Влияние на температурата върху полученото количество биогаз

4.4. Изследване на потенциала за производство на биогаз в птицеферми в България

Птицевъдството е традиционен отрасъл на животновъдството в България. Понастоящем в страната освен големите птицеферми, функционират и редица по-малки стопанства за яйца и птиче месо. През последните години за птиче месо и яйца се отглеждат промишлено между 15 и 22 милиона птици, от които 8-10 милиона носачки, които ежедневно генерират от 4000 до 6000 т екскременти. В годишен аспект това определя едно количество от близо 500 000 т. Изборът на ефективен метод и техника за третиране на птичите отпадъци е особено важен за райони, в които са съсредоточени повече големи птицевъдства, с което нараства в по-голяма степен риска за замърсяване на околната среда и застрашаване здравето на хората. Понастоящем в нашата страна третирането на птичите отпадъци се извършва в близост до птицевъдствата върху площадки, които не отговарят на нормативните изисквания, поради което голяма част от тях губят свои ценни качества и представляват екологическа заплаха за състоянието на горите, водоемите и обработваемите земи. Техничко-икономическите и екологични анализи и изследвания доказват необходимостта от прилагане на най-добрите налични практики за оползотворяване на птичите отпадъци като суровинен и енергиен ресурс.

Извършено е пресмятане на главните параметри на инсталация за производство на биогаз към птицевъдство с 30 000 носачки в село Орешак. Пресмятанията са направени по усреднени данни за състава на птичия тор. Съставана екскрементите се определя от начина на хранене на птиците, но т.к. при промишленото отглеждане се използват смеси с константен състав, усреднените стойности са достатъчно точни за нуждите на настоящите изчисления. Средните стойности на състава на екскрементите са дадени в табл. 4.5.

Таблица 4.5

СВ, %	20-34
ОСВ от СВ, %	70-80
кг ОСВ/ден	5.5-10
pH	7-8
Фибри, % от СВ	12
Мазнини, % от СВ	2
Протеин, % от СВ	26
Въглехидрати, % от СВ	27
Общ азот, г/л	17
Отделен газ л/кг ОСВ	327-722
Отделен газ, м ³ /GV/ден	3.5-4.0
Среден добив на газ	3.75

При отделяни средно на ден 0.00020 m³ екскременти от птица [Biogas-Praxis], при 30 000 се получава 6 m³/d.

На годишна база се получават 6 m³/d x 365 d = 2 190 m³/a.

Времето на престой избираме 35 дни, съгласно литературни данни и резултатите от проведените експерименти.

Ефективен обем на ферментатора: (2 190 m³ / 365 d) x 35 d = 210 m³.

С добавяне на обем за биогаза, който при сухите реактори е по-малък, поради използването на външни газхолдери, и добавяне на допълнителен обем за разбърващи устройства, можем да приемем общ обем на ферментатора 250 m³.

Неоходимо е да се пресметне натоварването на ферментатора по органично вещество, което има определящо значение за стабилността на процеса.

Приемаме, че съдържанието на сухо вещество е 35%, а на органично сухо вещество е 75% от сухото вещество (табл. 3.5). По този начин се получава:

$$6000 \text{ kg/d} \times 0.35 = 2100 \text{ kg СВ/d}$$

.....

За да се намали натоварването могат да е предприет два различни подхода:

- Да се намали количеството подаван към реактора на ден птич тор;
- Да се намали количеството на сухото вещество чрез разреждане.

Имайки предвид, получените резултати при експерименталното изследване на производството на биогаз при различни стойности на количеството на сухото вещество, както и от проведените симулации, най-добри резултати от гледна точка на производството на биогаз би следвало да се очакват в диапазона 15-25% СВ. Избираме 20%.

От определеното количество на органично сухо вещество може да бъде определено количеството на отделен биогаз. За целта се използват усреднени стойности [40].

Приемаме средна стойност на отделения биогаз 525 l/kg ОСВ. При определеното количество от 900 kg ОСВ/d се получава:

$900 \text{ kg OCB/d} \times 525 \text{ l/kg OCB} = 472500 \text{ l/d} = 472.5 \text{ m}^3/\text{d}$.

За работата на биогазовата инсталация е необходима топлина. Необходимата топлина е сума от топлината за подгряване на подавания към ферментатора субстрат до работната температура и топлината, необходима за компенсиране на топлинните загуби през стените на ферментатора.

Специфичната топлина за подгряване на субстрата зависи от съдържанието на сухо вещество и околната температура.

Специфичната топлина за компенсиране на загубите и поддържане на постоянна температура във ферментатора зависи от топлообменната повърхност, т.е. площта на стените на ферментатора, коефициента на топлопреминаване и температурната разлика с околното пространство.

При 20% сухо вещество на субстрата, необходимото количество топлина за подгряване е 222 Wh/kg CB или общо 266.4 kWh/d за 1200 kg/d сухо вещество.

При определения обем на ферментатора от 250 m^3 , необходимото количество топлина за компенсиране на загубите е 273.5 W/m^3 или общо 68.4 kWh/d .

Общото необходимо количество топлина е 334.6 kWh/d .

Определяне на мощността на когенератора при КПД 33%:

$$260 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{d} \times 10 \text{ kWh/m}^3 \times 0.33 = 858 \text{ kWh/d} / 24 \text{ h/d} = 35.75 \text{ kW}$$

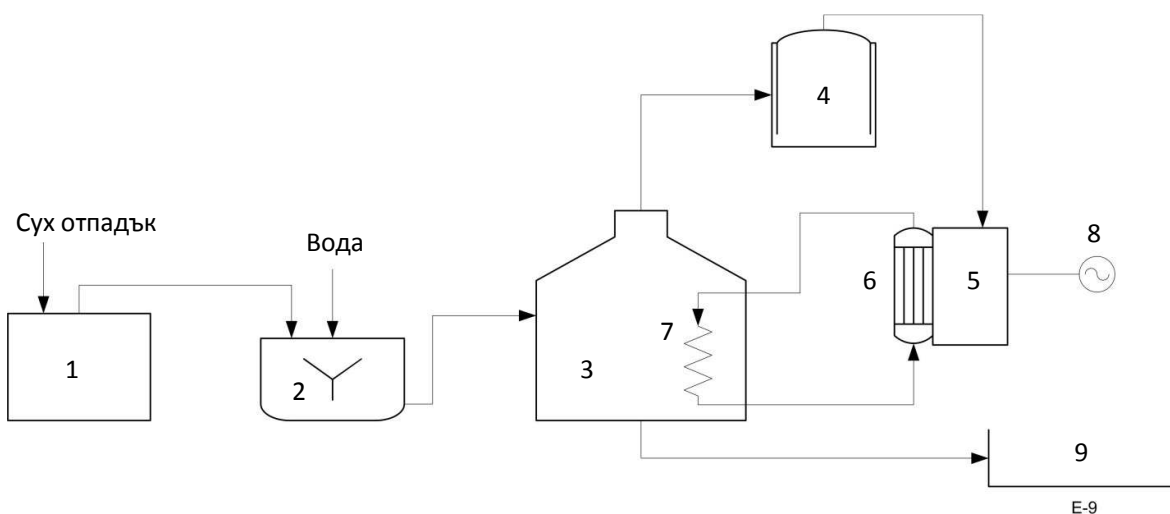
Обикновено се приема 20% запас на мощност. Така окончателно мощността на генератора се получава 42.9 kW .

Окончателно параметрите на биогазовата инсталация са дадени в таблица 4.8.

Таблица 4.8

Дневно зареждане	$6 \text{ m}^3/\text{d}$
Годишен капацитет	$2\,190 \text{ m}^3/\text{a}$
Време на престой	35 дни
Обем на ферментатора	250 m^3
Натоварване	$3.6 \text{ kg OCB/m}^3.\text{d}$
Дневно производство на биогаз	$472.5 \text{ m}^3/\text{d}$
Дневно производство на метан	$260 \text{ m}^3/\text{d}$
Получено количество топлина	2600 kWh/d
Топлина за собствени нужди	334.6 kWh/d
Електроческа мощност на когенератора	42.9 kW

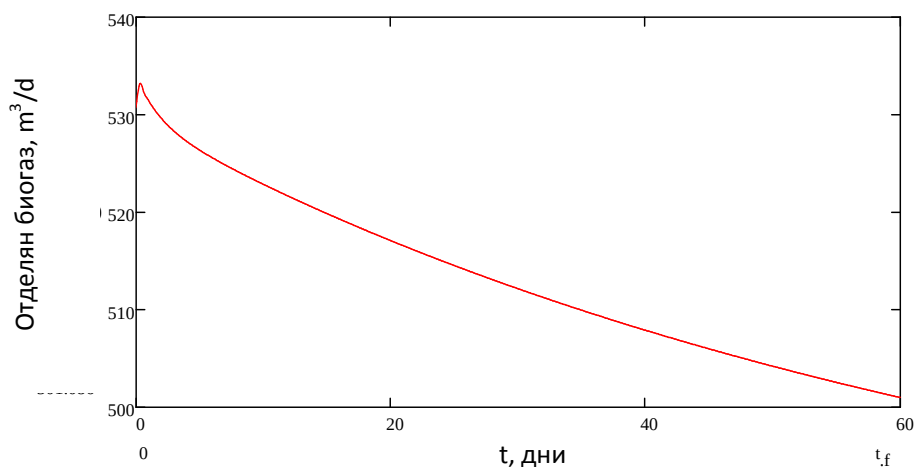
Разработена е схема на предлаганата инсталация за производство на биогаз. Схемата е показана на фиг. 4.5. Специфичното в предлаганата инсталация е наличието на смесител-хомогенизатор, в който се подава сух отпадък (птичи екскременти) и вода в необходимото съотношение за постигане на необходимото съдържание на сухо вещество от 20%.



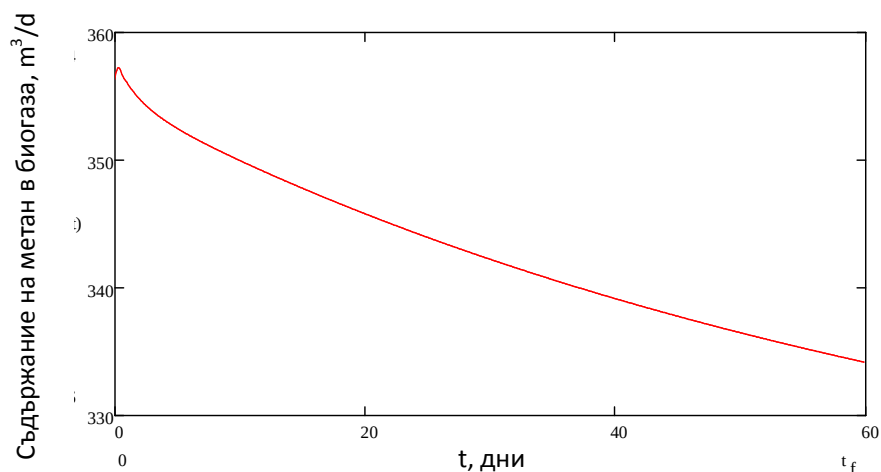
Фиг. 4.5 Схема на инсталация за производство на биогаз чрез самостоятелно разграждане на птичи тор: 1) Бункер за сух субстрат; 2) Смесител/хомогенизатор; 3) Биореактор; 4) Газхолдер; 5) Газов двигател; 6) Охлаждане на двигателя; 7) Подгряване на реактора; 8) Генератор; 9) Бункер за изходящ субстрат

4.5. Симулиране на процеса на анаеробно разграждане в проектираната инсталация

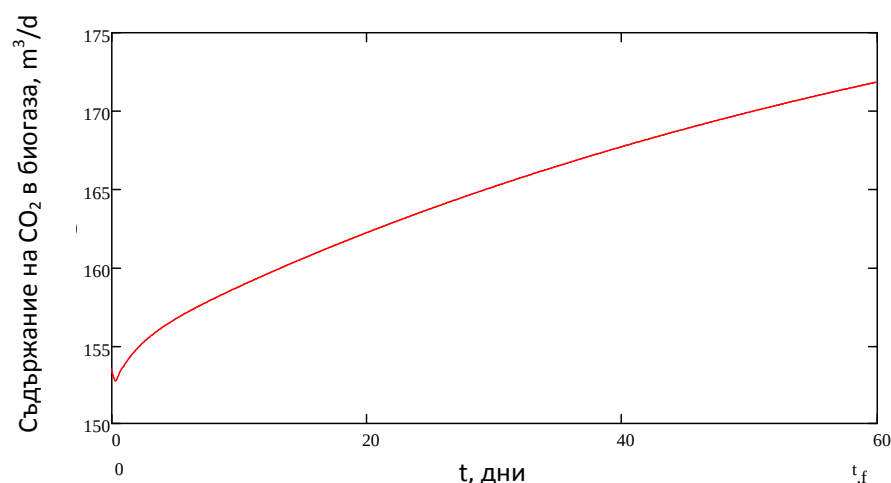
Разработения модел на анаеробното разграждане е приложен са симулиране на процеса в предлаганата инсталация за производство на биогаз. Определено е как се изменя количеството на отделения биогаз, както и неговия състав – съдържание на CH_4 , CO_2 . Резултатите от симулацията са дадени съответно на фиг. 4.5 до 4.7. Полученото количество биогаз на килограм сухо вещество е около средната стойност, характерна за този субстрат, която е приета при оразмеряване на инсталацията, но използването на динамичен дава възможност да се проследи изменението на добива на биогаз във времето, който не е постоянен.



Фиг. 4.5 Производство на биогаз в l/kg ОСВ



Фиг. 4.6 Съдържание на метан в биогаза в l/kg ОСВ



Фиг. 4.7 Съдържание на CO₂ в биогаза в l/kg ОСВ

ПЕТА ГЛАВА

5. Изводи и проноси от дисертационния труд

5.1. Изводи

1. Моделирането на процеса на анаеробно разграждане е единствения надежден начин за определяне на изменението на параметрите на процеса в реално време. Измерването на критични параметри на процеса е възможно само в лабораторни условия, което не дава възможност за динамично управление на процеса и може лесно да се достигне до преустановяване на процеса.

2. Повечето известни модели на анаеробното разграждане дават надеждни резултати само за вида на субстрата, за който са изведени. Най-широк обхват от гледна точка на брой на процесните параметри, моделирани подпроцеси и приложимост за различни видове субстрат е модела на IWA Task Group – Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (ADM1).

3. Модела ADM1 дава висока достоверност на резултатите при моделиране на анаеробното разграждане, което е доказано с реализирания в настоящата работа програмно модел.

4. Моделирането на процеса на анаеробно разграждане дава възможност за прогнозиране на работата на инсталацията при промяна в състав на субстрата или на процесните параметри. По този начин се създава възможност за предотвратяване на проблеми или спиране на процеса на ферментация поради липса на достатъчна информация за протичането на процеса в реално време.

5. Експерименталното изследване на процеса на анаеробно разграждане на птичи екскременти без коферменти показва, че е възможно да се поддържа стабилен процес при средно съдържание на сухото вещество 20%, което се постига чрез разреждане на тора с вода, и мезофилни условия.

6. В България е наличен висок потенциал за използване на генерираните от птицефермите отпадъци от птичи тор, както за задоволяване на собствените нужди от топлинна енергия, така и за получаване на електроенергия.

7. Приложението на локални инсталации към птицефермите, е ефективен начин за решаване на проблемите с управлението на отпадъците от птицефермите, които към момента не са решени.

8. Разработването на типов проект, с параметри предложени в глава 4 на дисертационни труд, който да се мултиплицира ще снижи разходите за проектиране и ще създаде възможност за натрупване на опит при експлоатацията на инсталацията, което ще улесни и подобри управлението на процеса.

5.2. Приноси

С реализирането на дисертационния труд са постигнати следните приноси имащи характер на нови класификации, методи, модели, бази данни и алгоритми и адаптиране на съществуващи такива в нова предметна област:

Научно-приложни приноси:

1. Реализиран е програмно модел на процеса на анаеробно разграждане на бомаса, който може да бъде използван за прогнозиране на процеса на получаване на биогаз при проектирането и експлоатацията на биогазовите инсталации.
2. Доказана е възможността за използване на математически модели за прогнозиране на работата на реална инсталация за получаване на биогаз, като по този начин да се вземат решения за управлението на инсталацията.
3. С реализирания програмно модел е изследвано влиянието на температурата върху производството и състава на биогаза.
4. Доказана е възможността с реализирания модел, по изменение на концентрацията на компонентите на субстрата да се съди за възможни прекъсвания на процеса.
5. С реализирания програмно модел е симулирано изменението във времето на съдържанието на отделни компоненти на субстрата, имащи ключово влияние върху стабилността на процеса и дебита на отделяния биогаз.
6. Експериментално са определени параметри, като степен на разреждане, температура и рН, при които може да бъде поддържан стабилен процес на самостоятелно анаеробно разграждане на птичи екскременти.

Приложни приноси:

1. Направена е числена проверка на реализирания в средата на MathCAD модел за конкретна инсталация и е доказана неговата адекватност и приложимост при управление на процеса в инсталациите за биогаз.

2. Изследвано е влиянието на параметри на процеса на анаеробно разграждане върху производството и състава на получения биогаз, посредством реализирания модел.

3. Доказана е възможността за самостоятелно анаеробно разграждане на птичи тор в малки инсталации към птицефермите.

4. Определени са основните параметри на инсталация за производство на биогаз за средно-голяма птицеферма, с типичен за голяма част от фермите брой на птиците.

5. Предложена е технология за производство на биогаз от птичи екскременти, като са определени параметрите на процеса, които осигуряват неговата стабилност и е разработена технологична схема на инсталацията.

6. Симулиран е процеса на анаеробно разграждане в предлаганата инсталация, посредством реализирания в MathCAD модел.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД:

1. Христова Р., Изследване на съществуващите числени модели на процеса на анаеробно разграждане, сп. Устойчиво развитие, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 76-81
2. Христова Р., Числено моделиране на процеса на анаеробно разграждане, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 90-95
3. Христова Р., Експериментално изследване на процеса на анаеробно разграждане на птичи тор, бр. 2, 2017, ISSN 1314-4138, стр. 104-108
4. Христова Р., Оползотворяване на отпадъците от птицеферми чрез анаеробно разграждане, сп. сп. Машиностроителна техника и технологии, кн. 2, 2017, 1312-0859, стр. 64-66, под печат

ABSTRACT

TOPIC OF THE DISSERTATION:

“STUDY OF THE BIOGAS PRODUCTION PROCESS”

The problems involved in this work concern the numerical modeling of processes in biogas plants that can provide more reliable results in designing installations, forecasting the operation of the plant during its operation, and making adequate process management decisions. It has also been investigated the operation of a poultry manure plant that has high potential for biogas production but creates problems for the process stability that can be solved by modeling the process

The aim of the dissertation thesis is to develop models and algorithms to optimize the processes of anaerobic digestion in the biogas plants and to support the process management by predicting them using mathematical models of the process.

To achieve the main goal, the following tasks are set:

1. Examine the existing mathematical models of the anaerobic digestion process.
2. To select a basic model with sufficiently wide applicability and accuracy to be able to find practical application in real-time process management
3. To adapt the model to the needs of the operation of biogas installations and to implement the program
4. To experimentally investigate the impact of process parameters on biogas production
5. Study the impact of process parameters on the production of biogas through the synthesized model

A model of the anaerobic digestion process of biomass has been developed which can be used to predict the biogas process in the design and operation of biogas plants. The model is verified using experimental results. The possibilities of using mathematical models of the anaerobic digestion process in the design and management of a biogas plant were studied. Experimental determination is done of the degree of dilution of the poultry manure in which a stable self-anaerobic degradation process can be maintained.

The influence of parameters of the anaerobic digestion process on the production and composition of the resulting biogas through the developed model is investigated. The possibility of self-anaerobic degradation of poultry manure in small installations to poultry farms has been proven. The basic parameters of a biogas plant for medium-sized poultry farms, with the number of birds typical for a large number of farms.

СЪДЪРЖАНИЕ

ХАРАКТЕРИСТИКА НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....Стр. 3

СЪДЪРЖАНИЕ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД.....Стр. 7

СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА

СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ И ТАБЛИЦИТЕ

ВЪВЕДЕНИЕ

ПЪРВА ГЛАВА

1. Анализ на съществуващото ниво и актуалност на темата
 - 1.1. Предимства и недостатъци на енергията от биогаз
 - 1.2. Устройство на биогазовите инсталации
 - 1.3. Суровинна база
 - 1.4. Процес на анаеробно разграждане. Основни фази
 - 1.5. Параметри на процеса на анаеробно разграждане
 - 1.5.1. Процесни параметри
 - 1.5.2. Дебит и качество на биогаза
 - 1.5.3. Оперативни параметри
 - 1.6. Моделиране на процеса на анаеробно разграждане
 - 1.6.1. Постановка на проблема
 - 1.6.2. Моделиране на нарастването и развитието на микробната популация
 - 1.6.3. Моделиране на разграждането на субстрата
 - 1.6.4. Моделиране на образуването на продуктите на микробиологичната реакция
 - 1.7. Изводи
 - 1.8. Цели и задачи на дисертационния труд

ВТОРА ГЛАВА

2. Избор на базов модел за симулиране на процеса на анаеробно разграждане
 - 2.1. Анализ и оценка на съществуващите модели на анаеробното разграждане
 - 2.2. Модел на анаеробно разграждане Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (ADM1)
 - 2.2.1. Променливи на състоянието в модела ADM1
 - 2.2.2. Моделиране на биохимични процеси в модела ADM1
 - 2.2.3. Моделиране на физико-химичните процеси в модела ADM1
 - 2.2.4. Моделиране на киселинно-алкални реакции в модела ADM1
 - 2.2.5. Моделиране на масообмена течност-газ в модела ADM1
 - 2.3. Калибриране на модела
 - 2.3.1. Характеризиране на субстрата
 - 2.3.2. Определяне на кинетичните характеристики на модела
 - 2.4. Изводи

ТРЕТА ГЛАВА

3. Прилагане на модела Anaerobic Digestion Model Nr. 1 (ADM1) за симулиране и прогнозиране на процесите в биогазова инсталация
 - 3.1. Реализиране и тестване на модела
 - 3.2. Изследване на влиянието на флуктоациите на температурата върху производството на биогаз, посредством реализирания модел
 - 3.3. Симулиране на състава на получения биогаз и компонентите на субстрата, посредством реализирания модел
 - 3.4. Изводи

ЧЕТВЪРТА ГЛАВА

- 4. Експериментално изследване и моделиране на анаеробното разграждане на птичи екскременти
 - 4.1. Специфични особености на птичите екскременти като суровина за анаеробно разграждане
 - 4.2. Проблеми при процеса на анаеробно разграждане на птичи екскременти
 - 4.3. Изследване на анаеробното разграждане на птичи екскременти в експериментален реактор
 - 4.4. Изследване на потенциала за производство на биогаз в птицеферми в България
 - 4.5. Симулиране на процеса на анаеробно разграждане в предложената инсталация
 - 4.6. Изводи

ПЕТА ГЛАВА

- 5. Изводи и проноси от дисертационния труд
 - 5.1. Изводи
 - 5.2. Приноси

ЛИТЕРАТУРА