

МИННО-ГЕОЛОЖКИ УНИВЕРСИТЕТ

„Св. Иван Рилски“ – София



инж. Райно Николов Попов

**ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ СИСТЕМИ ЗА БИОГАЗ В ГРАДСКИ
ПРЕЧИСТВАТЕЛНИ СТАНЦИИ ЗА ОТПАДЪЧНИ ВОДИ**

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

на дисертационен труд за присъждане на
образователната и научна степен „доктор“
по научна специалност
„Системи и устройства за опазване на околната среда“

Научен ръководител:

доц. д-р Анатолий Ангелов

Рецензенти:

.....
.....

София, 2017 г.

Дисертационният труд съдържа 144 страници текст, 26 фигури, 58 таблици, 130 литературни източници.

Защитата на дисертацията ще се състои на 19.07.2017 г. (сряда) от 13,30 ч. в зала 204Б, МТФ, II етаж, МГУ.

Дисертационният труд, авторефератът, рецензиите и становищата на научното жури се намират в отдел „Следдипломна квалификация“ на МГУ „Св. Иван Рилски“ в сградата на Ректората, ет. 3, стая 79.

Автор: инж. Райно Николов Попов

Заглавие: ОПТИМИЗАЦИЯ НА ПРОЦЕСИТЕ ПРИ СИСТЕМИ ЗА БИОГАЗ В ГРАДСКИ ПРЕЧИСТВАТЕЛНИ СТАНЦИИ ЗА ОТПАДЪЧНИ ВОДИ

Annotation:

Wastewater treatment plants are the main technical means of managing the quality of water emissions and water basins . Waste water purification requires new technologies that are considerably more complex than conventional ones due to increased sludge. Anaerobic fermentation (methanisation) is widely used in waste treatment . This method mainly solves the tasks: "high mineralization" and "large biogas production". The two tasks are controversial, making it difficult to manage the installations. In order to avoid the problems it is necessary to conduct continuous control and precise adjustment of the process parameters. The control metrics used so far are difficult to measure and do not accurately reflect the status of the process. In this aspect, the introduction of one or two criteria, easily measurable and adequately reflecting the process, will facilitate the exploitative activity. On the other hand, there is a lack of universally accepted methods for the technological sizing of methane slabs in Wastewater Treatment Plants. Therefore, the creation of new modified methodologies for sizing facilities is an important task for the effective treatment and removal of sewage sludge.

The development of this dissertation thesis is motivated precisely by the problems in the operation of the biogas systems in the wastewater treatment plants. To solve these problems, a system for optimizing the processes of anaerobic fermentation of the sludge is proposed by non-traditional methods. A new criterion for controlling the technological process through the FOS/TAC ratio is proposed, which has not yet been applied in the treatment plants in Bulgaria. The capillary leaching time (CST) is also proposed as a new criterion for the degree of sludge mineralization and a new method and apparatus for its practical measurement has been developed. A new, modified methodology for the technological sizing of biogas plants with one-stage methane tanks has been proposed, which takes into account the main factors influencing the reactor volume and which is lower than that obtained under the current Bulgarian methodology.

Тираж: 25 бр.

Печат: Издателска къща „Св. Иван Рилски“ МГУ НИС

Адрес: 1700 София, Студентски град, МГУ „Св. Иван Рилски“

I. УВОД

В днешно време пречиствателните станции за отпадъчни води (ПСОВ) са сред основните технически средства при управление качеството на водните емисии и басейни. Техните параметри са съобразени със нормативните документи, регулиращи качеството на водите. Съгласно европейското и националното законодателства, при пречистването на отпадъчните води се изискват нови технологии на пречистване. Новите технологии са значително по-сложни от конвенционалните, което в голяма степен се дължи на увеличеното количество на отделяните утайки. Обемът на утаените материали в ПСОВ обикновено не надвишава 5% от този на отпадъчната вода, но в същото време третирането и отстраняването им създава сериозни проблеми.

Наред с другите технологии за третиране на утайките в градските ПСОВ широко се използва методът за „анаеробна ферментация“ (метанизация). При метанизацията основно се решават две задачи: висока степен на минерализация на утайките и голям добив на газово гориво. Двете цели са противоречиви (често взаимно изключващи се), което затруднява управлението на инсталациите. Този проблем налага търсенето на баланс между двете тенденции в различни експлоатационни условия, което от своя страна изисква прецизен контрол и бърза реакция за регулиране на технологичните параметри. Независимо от научния и технически напредък, при анаеробното разграждане се прилагат все още някои методи, които не отговарят на повишените нови изисквания. Използваните досега показатели са трудни за измерване и невинаги отразяват точно състоянието на процеса. В този аспект въвеждането на един или най-много два критерия, които са лесно измерими и адекватно отразяват процесите ще улесни изключително експлоатационната дейност. От друга страна все още липсват общоприети универсални методики за технологично оразмеряване на биологичните реактори, а известните в световната практика модели не обхващат изцяло процесите и съоръженията и не са общовалидни за различните видове инсталации в ПСОВ.

Съвременните научни и технически достижения, свързани с метанизацията на утайките могат да послужат за основа при търсене на нови параметри за контрол и са предпоставка за рационалното използване на съоръженията, чрез прецизно оразмеряване и управление. Разработването на настоящия дисертационен труд е мотивирано именно от важността на проблемите, свързани с работата на системите за производство на биогаз в ПСОВ от населени места.

II. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ

Основната цел на дисертационния труд е създаване на функционираща система за оптимизиране на процесите, наблюдавани в класическите съоръжения за анаеробна ферментация на утайки от отпадъчни води на населени места, чрез нетрадиционни методи за мониторинг на технологичните параметри при анализ на оразмерителните подходи в подобен тип инсталации. За реализирането на посочената цел трябва да бъдат решени следните задачи:

- 1) Да направи преглед на инсталацията за получаване и използване за биогаз в ПСОВ-Кубратово, като се изучат технологичната схема, устройството и начините на действие на основните съоръжения (в т.ч. описателна и графична част).
- 2) Да се изследва процеса на „анаеробна ферментация“ на утайките в СПСОВ чрез използване на познатите класически технологични параметри за мониторинг на технологичните процеси.
- 3) Да се направи избор на технологични параметри и се съберат данни за тях от работата на инсталацията за тригодишен период, като въз основа на тази информация се изведат заключения по отношение на тяхната динамика.
- 4) Да се избере метод и се извърши анализ на събраните и изчислени данни по отношение на различните целеви функции в зависимост от влиянието на изследваните технологични параметри.
- 5) Да се предложи нов ефективен критерий (или критерии), гарантиращ (и) бърз и сигурен контрол на анаеробната ферментация на утайките от смесените отпадъчни води в ПСОВ.
- 6) На база на съществуващи в световната практика подходи да се предложи универсална методика за оразмеряване на инсталациите за добив на биогаз в ПСОВ от населени места.

III. МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

1. Общ преглед на инсталацията за биогаз в СПСОВ

Софийската ПСОВ е в редовна експлоатация от 4.11.1984 г. По силата на сключения договор със Столична община се пречистват отпадъчни води от 1400000 е.ж. (таблица №1). Операторът осъществява мониторинг на отпадъчната вода и гарантира спазването на качествените показатели, посочени в таблица №2.

Таблица 1. Договорени отпадъчни водни количества за пречистване

<i>Дебит</i>	<i>От 2000 до 2002г. включително</i>	<i>От 2003г. до края на концесионния период</i>
За пълно пречистване	550 000 m ³ /d	750 000 m ³ /d
Максимален дебит	680 000 m ³ /d	750 000 m ³ /d

Таблица 2. Показатели на пречистените отпадъчни води

<i>Показател</i>	<i>Стандарт</i>
BOD	25 mg/l
COD	125 mg/l
SS	35 mg/l
Фекални колиформи	<100 cm ³
Общ азот	10 mg/l
Общ фосфор	1 mg/l

Третирането на утайките включва метанизация и обезводняване. Отпадъчните течности се връщат за повторно пречистване. Отделените газове се оползотворяват и изхвърлят, съгласно действащото законодателство. Възприетите методи осигуряват пречистване на утайката според равнищата дадени в таблица №3.

Таблица 3. Показатели на третираните утайки за периода 2000-2025 година

Параметър	Минимално изискване от края на 2000 година до края на концесионния период
Извличане на смесена първична и активна утайка	Отстраняване на 37% от летливите твърди вещества
Обезводняване на извлечената утайка	Концентрация на сухото вещество в обезводнената утайка – 25 м.%

Инсталацията за биогаз в Софийската ПСОВ се състои от следните основни системи:
Помпена станция за сурова утайка

Суровата утайка и уплътнената сгъстена активна утайка се смесват в черпателен резервоар, където се хомогенизират с пропелерни бъркачки. ПССУ е разположена между изгнивателите и гравитационните уплътнители. В нея са инсталирани центробежни помпи за утайкова вода и ексцентършнекови помпи за зареждане на метантанковете.

Биореактори (метантанкове)

Метанизацията на утайките се осъществява в едностепенни, хомогенни проточни метантанкове, без отдекантиране, работещи в мезофилен режим. Изгнивателите са четири с общ обем 28000 m³ и представляват железобетонни цилиндрично-конични конструкции с тухлена топлоизолация. Изгнилата утайка се отстранява от три различни нива през разтоварна камера, разположена върху покривната конструкция.

Система за рециркулация на субстрата

Рециркулацията се осъществява чрез центробежни помпи за гъсти течности с монтирани линейни смесители, в които суровата утайка се смесва с циркуляционния поток за инокулация и първоначално затопляне. Преди рециркулиращите помпи се извършва измерване на температурата и рН на субстрата.

Система за подгряване на утайката

Утилизационното стопанство произвежда топла вода с температура 90°C, която чрез центробежни помпи се изпраща към хидравличен разпределител, свързан към топлинен колектор. Топлата вода се подава към индивидуални топлообменници на ферментаторите, всеки от които има собствена тръбна мрежа, включваща помпа за топла вода, трипътен автоматичен кран и система за температурен контрол и управление на крана.

Система за газово разбъркване на субстрата

Основните части на системата са компресорно стопанство, инжекционна инсталация и съоръжения за очистване на биогаза. Газът от газовия купол се инжектира обратно в изгнивателя чрез ротационни газови компресори, всеки от които е оборудван с керамичен

филтър и центробежен сепаратор. Към всеки метантанк е инсталирано измервателно устройство за дебит и качество на биогаза, както и промивни водопроводи.

Система за пречистване и съхранение на биогаза

Системата се състои от газопроводи, газови филтри, измервателното устройство, газови факли и газхолдер за ниско налягане. Събирателните газопроводи на изгивателите са свързани в две отделни линии, които след филтрите се обединяват в магистрален газопровод. В сухия газхолдер налягането в системата се регулира чрез теглото на баластна тежест, а кондензатът се отвежда с дренажна помпа от сутерена на резервоара.

2. Изследване на процеса „анаеробна ферментация“ в инсталацията за биогаз на СПСОВ чрез използване на класически параметри

2.1.Избор на параметри за нуждите на изследването

За характеризирание на процесите в инсталацията за биогаз на СПСОВ са избрани няколко параметъра, част от които се измерват директно, а други се пресмятат. Данните са събрани за периода 2014-2016 год.

Избраните параметри могат да бъдат условно разделени в три групи:

- 1) Физикохимични показатели на утайките: водороден показател; обща алкалност; алкалност на летливите мастни киселини; бикарбонатна алкалност; летливи мастни киселини; влажност; органично съдържание.
- 2) Измерени технологични параметри: количество на суровата утайка; температура на субстрата; обем на произведения биогаз; съдържание на метан в биогаза.
- 3) Пресметнати технологични параметри: време на престой; органично натоварване; степен на изгиване на утайката.

2.2.Методи за определяне стойностите на избраните параметри

Предварителна подготовка на пробите

Предварителната подготовка на пробите включва хомогенизиране и центрофугиране. Използвани са магнитна бъркалка Nahita-5061 и центрофуга PCV-2400 combispin™. Обработвани са проби, взети от входа и изхода на реакторите (сурова и изгнила утайка).



Определяне pH на утайките

Определянето на pH е потенциометрично (БДС EN 15933), чрез *microprocessor pH-meter HI 9021 HANNA*.

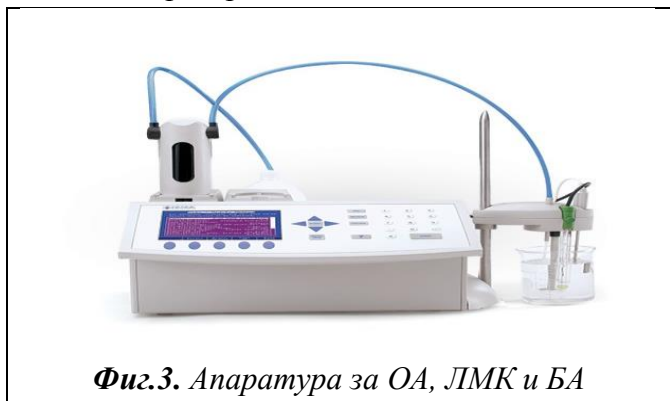


Определяне на обща алкалност (ОА), ЛМК и бикарбонатна алкалност (БА)

Параметрите се определят съгласно стандартизирана методика, която включва:

- потенциометрично титруване на центрат от утайка до pH=4 със HCl или H₂SO₄, при което се определя ОА;
- последващо обратно титруване до pH=7 със силна основа за определяне на ЛМК;
- БА е определена като разлика между ОА и алкалността на ЛМК.

Използван е автоматичен титратор *Hanna HI-902C1*.



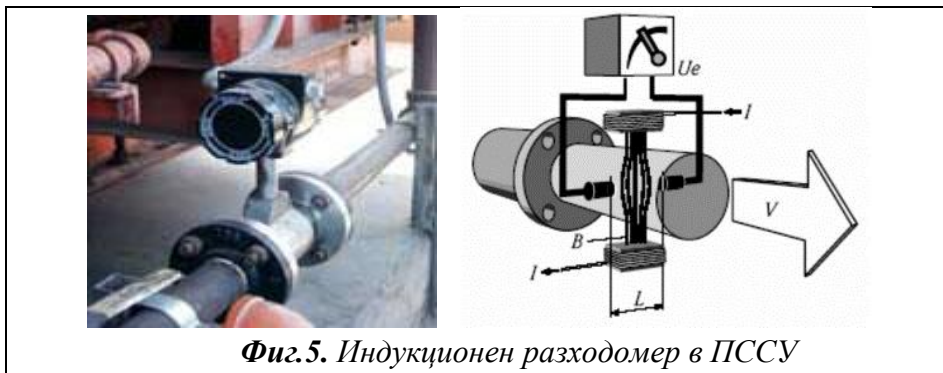
Определяне на общ сух остатък и органично сухо вещество

Стойностите на общия сух остатък и органичното вещество са определяни чрез гравиметричен анализ (EN 12880:2000) по два начина: експресен – с влагоанализатор *K-MRS* и аналитичен – с: аналитична везна *K-ABT*, стерилизатор-сушилна *AL01-02-100* и муфелна пещ *HTL 02-18*.



Измерване на количеството заредена утайка

Измерването на количеството утайка се извършва чрез магнитоиндукционни разходомери D_{y150} , монтирани на нагнетателните тръбопроводи след помпите в ПССУ. При тези разходомери няма части вътре в тръбопровода и практически липсват загуби на налягане. Сигналът от измерването е визуализиран с вторични прибори, монтирани на таблото за контрол и управление (МСС) в диспечерната зала.



Фиг.5. Индукционен разходомер в ПССУ

Измерване на температурата

Температурата на субстрата в реакторите е измерена по два начина:

- 1) Непрекъснато – с термоизмервателна сонда PT-100 ESPA01 AB01, като получената информация се визуализира на дисплей в сградата, обслужваща ферментаторите и на таблото за контрол и управление (МСС) в диспечерната зала.
- 2) Периодически – чрез отделяне на проби и ръчно измерване.

Измерване на биогаза

Количествените и качествени параметри на биогаза са измерени:

- 1) С преносим газоанализатор *X-am 7000 DREGER* е определен качественият състав на биогаза. Измерено е обемното съдържание на пет от компонентите, при което обхватът на апаратурата е в следните граници: CH_4 – $0 \div 100$ об.%; CO_2 – $0 \div 100$ об.%; O_2 – $0 \div 25$ об.%; CO – $-1 \div 10$ ppm; H_2S – $20 \div 900$ ppm.



Фиг.6. Ръчно измерване на качествения състав на биогаза

- 2) Стационарна система за биогаз – състои се от две измервателни групи:
А. За количествено и качествено измерване на параметрите:

- Обемно съдържание на CH₄, CO₂, O₂, CO, H₂S. Получените данни са визуализирани на монитора на местното табло и на РС в диспечерната зала.



Фиг. 7. Термоанемометрично измерване на дебита на биогаза

- Количество на произведения биогаз. Дебитът на газа се определя термоанемометрично в пет точки на тръбопроводната мрежа, след всеки метантанк и в магистралния газопровод. Получените сигнали се визуализират на монитора на местното табло и на РС в диспечерната зала.

Б. За наличие на опасна атмосфера и сигнализация.

Сензорите за измерване са разположени: в сутерена, на първия етаж на сградата до метантанковете, в помещенията до изгнивателите и газхолдера. Всеки сензор измерва своята зона и подава сигнал на 12-канален контролер.

Определяне на времето за престой на утайките в биореакторите

Времето за престояване на утайките в реакторите е изчислено въз основа на получените данни чрез отношението между сумарния работен обем на реакторите и дебита на заредената сурова утайка:

$$T = V/Q, \text{ d.} \quad (1)$$

Определяне дозата на органично натоварване

Дозата на органичното натоварване е изчислена чрез отношение между количеството на органичното вещество (Q_{os} , m³/d) в заредената утайка и обема на реакторите (V , m³):

$$D_{os} = Q_{os}/V, \text{ kg/(m}^3 \cdot \text{d)} \quad (2)$$

$$Q_{os} = Q \cdot SS \cdot OS \quad (3)$$

$$\text{Следователно: } D_{os} = Q \cdot SS \cdot OS / V \quad (4)$$

където: Q – дебит на заредената суровина; SS , м.% – съдържание на общото суспендирано вещество в суровата утайка; OS , м.% е органичната част на суспендираните вещества.

Определяне на степента на разграждане (минерализация)

Степента на разграждане на утайката се изразява чрез отношението на масата на биоразграденото органично вещество спрямо първоначалната органична маса, съдържаща се в суровите утайки. На практика, ако в сухото вещество на суровата утайка отношението на органичните към неорганичните вещества е около 2:1, след анаеробната ферментация това отношение намалява приблизително до 1:1, т. е. степента на минерализация обикновено е 40÷50%.

3. Изследване на процеса „анаеробна ферментация“ в инсталацията за биогаз на СПСОВ чрез използване на нетрадиционни параметри

3.1.Избор на параметри за изследването

Изборът на нетрадиционни за досегашната практика параметри за характеризиране на процеса „анаеробна ферментация“ е направен въз основа на следните критерии:

- 1) Обработка на възможно най-малки количества субстрат при изследването;
- 2) Минимално време за извършване на анализите;
- 3) Възможност за пряко измерване на избраните параметри;
- 4) Методите да притежават количествени измерения;
- 5) Висока степен на точност при измерване;
- 6) Ограничено поле за разсейване на получените данни;
- 7) Простота при обслужване на използваната апаратура;
- 8) Параметрите да не са прилагани в ПСОВ (по данни от наличните източници);
- 9) Съответствие с изискванията за безопасност и здраве при работа.

Въз основа на посочените критерии са избрани параметрите: „отношение между летливите органични киселини и алкалния буферен капацитет“ (FOS/TAC) и „време за капилярно просмукване“ (CST).

3.2.Методи за определяне на стойностите на избраните параметри

Метод за определяне на съотношението FOS/TAC

Параметърът FOS/TAC на субстрата се определя по метода на *Nordmann*. Изследваната проба предварително се центрофугира и супернатантата се разрежда с дестилирана вода. Титрува се получената проба от първоначалната стойност до pH=5 с 0,1N разтвор на H₂SO₄. С получения резултат се изчислява стойността на алкалния буферен капацитет (*Totales Anorganisches Carbonat* – TAC), в mgCaCO₃/l. Концентрацията на летливите органични киселини (*Flüchtige Organische Säuren* – FOS), в mgCH₃COOH/l се получава при втория етап на изследването, чрез титруване между pH – 5,0 и 4,4.

При измерванията е използван автоматичен програмируем титратор Nach Lange.



Преди титруването се измерва първоначалния pH съгласно ISO 10523:2008.

Пресмятането на резултатите се извършва по следните формули:

$$TAC = (A \cdot C_m \cdot 50045) / V$$

(5)

$$FOS=[(B.4.1,66)-0,15].500 \quad (6)$$

където: A [ml] е обем на титранта за титруване от първоначалната стойност на рН до рН=5,0; C_m [eq/l] – концентрация на титранта; V – обем на пробата (работи се с 5 ml); B [ml] – разлика между обемите на титранта за титруване до рН=5,0 и до рН=4,4.

Преди работа електродът се калибрира, съгласно стандарт ISO 10523:2008.

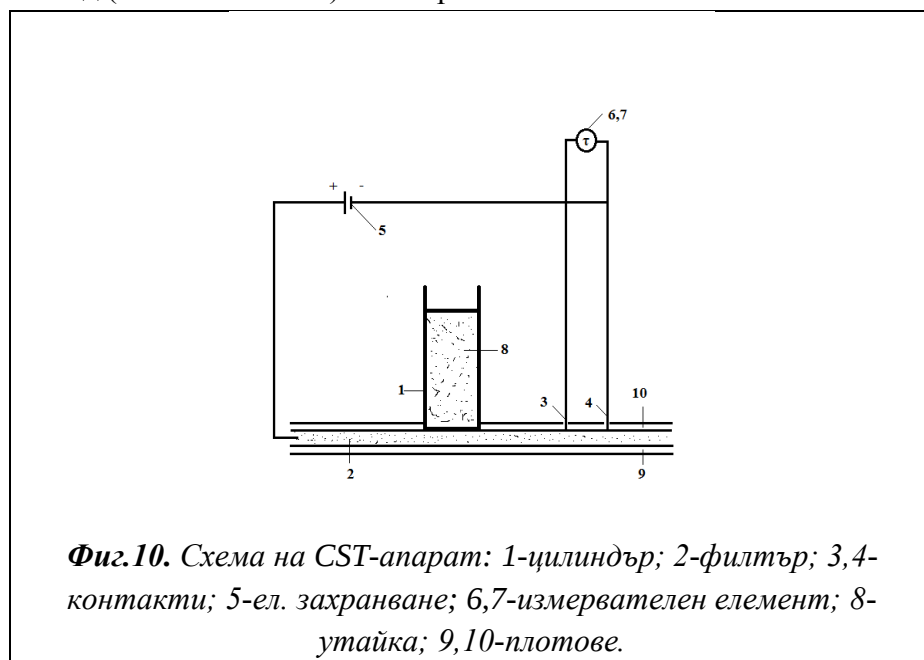
Метод за определяне на параметъра CST

Параметърът CST се въвежда с БДС EN 14701-1:2006. Показател за обезводняващата способност на утайката е времето, за което отделящата се вода се просмуква във филтър с еднородна структура между две точки на стандартно разстояние една от друга. Измервателната апаратура е разработена специално за изследването от колектив на МГУ-София. Външният ѝ вид и начинът на работа са показани на фигура №9.



Фиг.9. Измерване на CST

Принципната схема на апаратурата (фигура №10) се състои от две основни групи: филтрационен стенд (механична част) и измервателен блок.



IV. РЕЗУЛТАТИ И ОБСЪЖДАНЕ

1. Изследване на процеса „анаеробна ферментация“ в инсталацията за биогаз на СПСОВ чрез използване на класически параметри, през периода 2014-2016 г.

1.1.Получени данни от изследването

Получените данни са резултат от множество измервания в периода 2014-2016 г. в СПСОВ при третирането на смесени утайки в мезофилен режим. Резултатите са анализирани с цел да послужат като основа за въвеждане на нови критерии за контрол на процеса и разработване на универсална методика за оразмеряване на метантанковете.

В таблица №6 са дадени стойностите на рН на утайката преди и след реакторите. Резултатите показват, че липсват значителни отклонения спрямо литературните данни и че съществува права нелинейна зависимост между входните и изходни стойности на рН.

В таблица №7 е показана динамиката на общата алкалност за двата вида изследвани проби. От резултатите личи сезонна зависимост на стойностите и наличие на връзка между общата алкалност на входящите и изходящите утайки.

В таблици № 8, 9, 10 са включени стойностите на бикарбонатната алкалност, алкалността на ЛМК и концентрацията на ЛМК за суровата и изгнилата утайка. Голямото разсейване показва, че промените нямат сезонен характер и липсва връзка между измерваните параметри (нямаме предвид зависимостта $BA=OA-k.LMK$).

Данните от измерванията на влагосъдържанието на утайките са включени в таблица №11. Тесният интервал, в който се изменят стойностите налага при изследването да се приложат методи от статистическия анализ в математиката.

При органичното съдържание (таблица №12) се наблюдава права (но нелинейна) зависимост между входните и изходни данни, както и сезонно изменение (което вероятно се дължи на начина на хранене на населението).

В таблица №13 са представени заредената сурова утайка и общото сухо вещество. Тъй като зависят от постъпилите водни количества и замърсеността, тези характеристики са използвани като независими параметри при изследването.

Температурата в реакторите и на околния въздух е дадена в таблица №14. Очевидно е влиянието на околната температура върху загряването на субстрата.

Зареденото органично вещество и органичното натоварване (изчислено чрез органичната част на утайките и работния обем на биореакторите са в таблица №15.

Таблица №16 дава степента на разграждане на утайките, изчислена по формулата:

$$B=(Q_{cy}.CB_{cy}.OB_{cy}-Q_{ny}.CB_{ny}.OB_{ny})/(Q_{cy}.CB_{cy}.OB_{cy}) \quad (8)$$

където: Q_{cy} , m^3 е количество на заредената сурова утайка, CB_{cy} % – общо сухо вещество в суровите утайки; OB_{cy} % – органичното съдържание на суровите утайки; Q_{ny} , m^3 е количеството изгнила утайка, извадена от реакторите (при хомогенните едностепенни метантанкове без отделяне на утайкова вода Q_{ny} се приема равна на Q_{cy} ; CB_{ny} % – сухо съдържание на изгнилите утайки; OB_{ny} % – органично съдържание на изгнилите утайки.

В таблица №17 са представени стойностите за количеството на продуцирания биогаз и съдържанието на метан в газовата смес.

Таблица 6. Динамика на рН на утайките

Показател Месец	рН на суровата утайка за 2014 г.	рН на изгнилата утайка за 2014 г.	рН на суровата утайка за 2015 г.	рН на изгнилата утайка за 2015 г.	рН на суровата утайка за 2016 г.	рН на изгнилата утайка за 2016 г.
Януари	5,7	7,2	6,4	7,5	6,4	7,2
Февруари	5,6	7,3	6,5	7,4	6,4	7,2
Март	5,6	7,3	6,5	7,4	6,4	7,2
Април	5,8	7,1	6,6	7,5	6,1	7,3
Май	6,2	7,4	6,6	7,5	6,1	7,2
Юни	6,1	7,4	6,5	7,6	5,7	7,3
Юли	5,9	7,4	6,1	7,6	5,5	7,2
Август	5,9	7,5	6,1	7,7	5,7	7,2
Септември	6,1	7,5	6,0	7,4	6,2	7,4
Октомври	6,2	7,7	6,1	7,5	6,1	7,4
Ноември	6,3	7,7	6,3	7,7	6,2	7,4
Декември	6,7	7,7	6,1	7,5	6,0	7,3

Таблица 7. Динамика на общата алкалност на утайките

Показател Месец	ОА за 2014 година				ОА за 2015 година				ОА за 2016 година			
	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l	На СУ gCaCO ₃ /l	На ИУ gCaCO ₃ /l	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l	На СУ gCaCO ₃ /l	На ИУ gCaCO ₃ /l	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l	На СУ gCaCO ₃ /l	На ИУ gCaCO ₃ /l
Януари	20,80	71,45	1,04	3,57	15,61	73,11	0,78	3,66	12,23	60,28	0,61	3,01
Февруари	26,44	71,87	1,32	3,59	15,66	67,31	0,78	3,37	12,77	53,79	0,64	2,69
Март	24,31	69,29	1,22	3,46	15,92	65,18	0,80	3,26	12,84	50,33	0,64	2,52
Април	20,77	70,99	1,04	3,55	12,76	59,97	0,64	3,00	12,32	66,84	0,87	3,34
Май	17,65	65,14	0,88	3,26	16,26	66,06	0,81	3,30	14,43	68,95	0,72	3,45
Юни	17,05	66,37	0,85	3,32	18,77	67,17	0,94	3,36	19,55	68,93	0,98	3,45
Юли	18,55	68,31	0,93	3,42	18,08	65,23	0,90	3,26	18,92	66,77	0,95	3,34
Август	18,02	71,68	0,90	3,58	15,52	63,30	0,78	3,17	17,17	67,28	0,86	3,36
Септември	15,58	69,16	0,78	3,46	15,27	58,82	0,76	2,94	17,01	65,37	0,85	3,33
Октомври	14,70	67,08	0,74	3,35	14,76	54,12	0,74	2,71	16,74	64,91	0,84	3,25
Ноември	15,10	68,48	0,75	3,24	16,83	61,77	0,84	3,09	16,82	65,99	0,84	3,51
Декември	16,87	77,15	0,84	3,86	15,38	62,01	0,77	3,10	16,44	65,02	0,82	3,25

Таблица 8. Динамика на бикарбонатната алкалност на утайките

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	БА на суровата утайка, g CaCO₃/l	БА на изгнилата утайка, g CaCO₃/l	БА на суровата утайка, g CaCO₃/l	БА на изгнилата утайка, g CaCO₃/l	БА на суровата утайка, g CaCO₃/l	БА на изгнилата утайка, g CaCO₃/l
Януари	0,07	3,43	0,25	3,15	0,26	2,86
Февруари	0,19	3,47	0,38	3,52	0,33	2,57
Март	0,13	3,34	0,35	3,26	0,30	2,42
Април	0,19	3,43	0,29	3,20	0,29	3,23
Май	0,35	3,54	0,29	2,90	0,26	3,29
Юни	0,31	3,19	0,35	3,26	0,15	3,27
Юли	0,18	3,05	0,21	3,13	0,13	3,12
Август	0,26	3,35	0,19	3,00	0,13	3,12
Септември	0,26	3,22	0,15	2,56	0,14	3,10
Октомври	0,30	3,24	0,23	2,79	0,22	3,05
Ноември	0,31	3,27	0,25	2,95	0,25	3,31
Декември	0,26	3,18	0,29	2,99	0,27	3,01

Таблица 9. Динамика на алкалност на ЛМК

Параметър Месец	АЛМК за 2014 година		АЛМК за 2015 година		АЛМК за 2016 година	
	Сурова утайка g CaCO₃/l	Изгнила утайка g CaCO₃/l	Сурова утайка g CaCO₃/l	Изгнила утайка g CaCO₃/l	Сурова утайка g CaCO₃/l	Изгнила утайка g CaCO₃/l
Януари	0,97	0,14	0,53	0,14	0,35	0,15
Февруари	1,13	0,12	0,40	0,10	0,31	0,12
Март	1,08	0,13	0,45	0,11	0,34	0,10
Април	0,85	0,12	0,35	0,09	0,58	0,11
Май	0,53	0,11	0,52	0,11	0,46	0,16
Юни	0,55	0,17	0,59	0,10	0,83	0,18
Юли	0,75	0,23	0,70	0,14	0,82	0,22
Август	0,67	0,24	0,59	0,16	0,73	0,24
Септември	0,52	0,19	0,61	0,15	0,65	0,23
Октомври	0,43	0,11	0,50	0,14	0,61	0,20
Ноември	0,44	0,11	0,59	0,13	0,64	0,22
Декември	0,58	0,12	0,48	0,11	0,71	0,24

Таблица 10. Динамика на ЛМК (измерени като CH_3COOH) в утайките

Показател Месец	ЛМК за 2014 година				ЛМК за 2015 година				ЛМК за 2016 година			
	На СУ g/l	На ИУ g/l	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l	На СУ g/l	На ИУ g/l	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l	На СУ g/l	На ИУ g/l	На СУ mgeq/l	На ИУ mgeq/l
Януари	1,16	0,17	19,42	2,85	0,64	0,17	10,67	2,77	0,42	0,19	6,97	3,08
Февруари	1,36	0,14	22,65	2,43	0,48	0,12	8,09	2,06	0,37	0,14	6,14	2,32
Март	1,30	0,15	21,65	2,51	0,54	0,13	8,96	2,10	0,41	0,12	6,85	1,96
Април	1,02	0,14	17,00	2,35	0,42	0,11	6,96	1,87	0,69	0,13	11,57	2,14
Май	0,64	0,13	10,63	2,22	0,63	0,13	10,40	2,12	0,56	0,19	9,27	3,16
Юни	0,66	0,21	10,94	3,42	0,71	0,12	11,82	1,95	0,99	0,21	16,50	3,56
Юли	0,90	0,27	14,95	4,55	0,84	0,16	13,96	2,73	0,98	0,26	16,33	4,39
Август	0,80	0,28	13,32	4,70	0,70	0,19	11,74	3,24	0,88	0,29	14,61	4,90
Септември	0,62	0,23	10,36	3,88	0,73	0,18	12,22	3,07	0,82	0,30	13,67	5,00
Октомври	0,52	0,13	8,60	2,20	0,60	0,17	10,07	2,84	0,74	0,23	12,29	3,91
Ноември	0,55	0,18	9,18	3,02	0,70	0,16	11,73	2,69	0,67	0,23	11,17	3,83
Декември	0,70	0,21	11,67	3,50	0,58	0,13	9,59	2,15	0,59	0,21	9,84	3,50

Таблица 11. Влажност на входящите и изходящи утайки

Параметър Месец	Влажност за 2014 година		Влажност за 2015 година		Влажност за 2016 година	
	на суровата утайка, м. %	на изгнилата утайка, м. %	на суровата утайка, м. %	на изгнилата утайка, м. %	на суровата утайка, м. %	на изгнилата утайка, м. %
Януари	96,1	97,5	95,9	96,9	96,0	96,7
Февруари	95,9	97,3	95,8	96,5	96,3	96,6
Март	95,3	97,2	95,2	96,1	95,9	96,6
Април	94,6	96,3	95,9	95,9	95,0	96,4
Май	95,2	96,5	95,5	96,3	95,4	96,3
Юни	95,8	96,6	96,3	96,4	94,1	96,4
Юли	95,3	96,4	95,9	96,6	94,8	96,8
Август	95,8	96,5	96,1	96,4	95,5	96,8
Септември	96,0	96,7	96,2	96,7	95,5	97,1
Октомври	96,1	96,8	96,5	96,5	95,1	97,0
Ноември	96,1	96,9	96,0	96,5	95,5	97,1
Декември	95,8	96,9	96,2	96,5	95,8	97,3

Таблица 12. Органично съдържание (COB) в утайките

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	COB в суровата утайка, т. %	COB в изгнилата утайка, т. %	COB в суровата утайка, т. %	COB в изгнилата утайка, т. %	COB в суровата утайка, т. %	COB в изгнилата утайка, т. %
Януари	77,45	68,12	73,08	57,17	69,20	52,60
Февруари	74,26	68,47	66,86	53,02	68,30	51,20
Март	71,11	63,74	65,31	50,07	66,00	51,40
Април	65,53	56,39	62,10	42,11	68,70	52,50
Май	58,72	39,88	64,36	48,13	65,80	49,00
Юни	63,35	43,82	67,77	48,97	64,40	48,20
Юли	65,56	48,24	71,02	52,96	67,70	52,40
Август	69,65	49,40	69,50	53,10	67,30	49,90
Септември	66,18	49,82	70,20	54,90	73,30	55,70
Октомври	68,59	49,70	69,50	51,90	71,20	51,60
Ноември	70,31	53,22	72,70	57,50	73,30	55,70
Декември	70,61	54,01	74,00	56,40	75,20	49,80

Таблица 13. Количества сурова утайка и сухо вещество на вход-метантанкове

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	Заредена утайка Q_{cy}, m³	Заредено с.в. CB, t	Заредена утайка Q_{cy}, m³	Заредено с.в. CB, t	Заредена утайка Q_{cy}, m³	Заредено с.в. CB, t
Януари	39520	1541	56520	2317	56800	2272
Февруари	39690	1627	48340	2030	51040	1888
Март	49920	2346	55760	2676	56000	2296
Април	48080	2596	53280	2184	57040	2852
Май	52340	2512	55800	2511	58320	2683
Юни	53020	2226	53760	1989	57600	3398
Юли	52820	2483	54560	2237	58560	3045
Август	51140	2148	54560	2127	55320	2490
Септември	47955	1918	52800	2006	50560	2275
Октомври	50880	1984	53440	1870	56880	2787
Ноември	49840	1944	53400	2136	56200	2529
Декември	56720	2382	56640	2152	59400	2495

Таблица 14. Средномесечни температури в биореакторите и околната среда

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	Средна т-ра в реакторите T_{BR} , °C	Средноден. т-ра за района T_{ex} , °C	Средна т-ра в реакторите T_{BR} , °C	Средноден. т-ра за района T_{ex} , °C	Средна т-ра в реакторите T_{BR} , °C	Средноден. т-ра за района T_{ex} , °C
Януари	37,10	0,9	35,94	0,8	33,65	-0,9
Февруари	37,48	5,3	34,79	1,6	34,07	7,5
Март	37,44	8,1	32,95	4,6	34,08	7,1
Април	37,67	10,7	33,35	9,9	37,98	13,9
Май	37,50	14,3	38,16	16,9	38,76	14,1
Юни	37,77	18,1	40,11	18,0	40,75	20,5
Юли	38,52	20,3	41,00	23,2	41,48	22,3
Август	39,58	21,4	41,11	22,4	41,75	21,0
Септември	39,27	16,0	40,60	18,8	42,22	17,4
Октомври	37,89	10,8	38,09	10,5	41,04	10,5
Ноември	36,90	6,5	37,51	8,7	39,23	5,3
Декември	36,98	1,8	35,51	2,1	36,52	-0,4

Таблица 15. Количество заредено органично вещество и органично натоварване

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	Заредено ОВ Q_o , t/мес.	ОН H , kg/(m ³ .d)	Заредено ОВ Q_o , t/мес.	ОН H , kg/(m ³ .d)	Заредено ОВ Q_o , t/мес.	ОН H , kg/(m ³ .d)
Януари	1193,5	1,38	1693,3	1,95	1572,2	1,81
Февруари	1208,4	1,54	1357,3	1,73	1289,5	1,59
Март	1668,4	1,92	1747,7	2,01	1515,4	1,75
Април	1701,4	2,02	1356,3	1,62	1959,3	2,33
Май	1475,2	1,70	1616,1	1,86	1765,4	2,03
Юни	1410,7	1,68	1347,9	1,60	2188,3	2,61
Юли	1627,6	1,88	1588,7	1,83	2061,5	2,49
Август	1496,0	1,72	1478,3	1,70	1675,8	1,93
Септември	1269,5	1,51	1408,2	1,68	1667,6	1,99
Октомври	1361,0	1,57	1299,6	1,50	1984,3	2,29
Ноември	1366,7	1,63	1552,9	1,85	1853,8	2,21
Декември	1682,1	1,94	1592,5	1,83	1876,2	2,16

Таблица 16. Степен на разграждане на утайките

Параметър Месец	Степен на изгниване В, % за 2014 година	Степен на изгниване В, % за 2015 година	Степен на изгниване В, % за 2016 година
Януари	50,2	48,2	47,1
Февруари	45,1	45,0	50,3
Март	43,6	45,3	44,1
Април	43,0	56,0	49,2
Май	56,9	48,7	49,4
Юни	51,3	56,0	48,1
Юли	49,5	53,4	46,9
Август	56,1	51,8	51,0
Септември	50,0	50,7	53,5
Октомври	54,9	56,0	56,1
Ноември	50,8	50,1	53,5
Декември	50,3	57,4	49,8

Таблица 17. Количество и качество на продуцирания биогаз

Параметър Месец	За 2014 година		За 2015 година		За 2016 година	
	Количество на биогаза, м ³ /мес.	Съдържание на CH ₄ , об.%	Количество на биогаза, м ³ /мес.	Съдържание на CH ₄ , об.%	Количество на биогаза, м ³ /мес.	Съдържание на CH ₄ , об.%
Януари	754 900	66	992 280	64	1 090 960	63
Февруари	760 640	63	842 740	64	960 360	64
Март	984 620	65	923 600	63	941 060	64
Април	964 506	65	795 720	64	1 156 180	64
Май	854 580	65	1 020 500	64	1 084 918	63
Юни	850 840	64	1 009 990	64	1 094 908	64
Юли	948 550	61	1 034 740	62	1 075 714	63
Август	887 050	61	986 806	63	956 820	63
Септември	815 000	61	936 372	64	904 280	62
Октомври	871 273	61	977 120	62	1 159 680	61
Ноември	899 140	60	1 131 410	61	1 146 585	64
Декември	965 790	63	1 164 600	61	1 195 240	66

1.2. Анализ на получените данни от изследването на инсталацията за биогаз в ПСОВ, чрез корелационния метод

За анализиране на събраните данни е избран корелационният метод. Корелационната скала е ординална – категоризира променливите така, че са обозначени качествените разлики между различните категории; второ – ранжира категориите по смислен начин. Поради това получените от изследванията резултати сме подредили релационно (в отделни таблици), с което е изпълнено първото условие за прилагане на метода. Второто условие на метода е да има данни за две различни променливи (x) и (y), при което на всяка стойност за x да съответства стойност на y (това условие също е изпълнено). Бивариационното честотно разпределение е изследвано чрез коефициента на корелация (R), който приема стойности в интервала $(-1;1)$. Когато $R=0$, липсва корелация; когато $R=\pm 1$, зависимостта между двете променливи е линейна. Знакът пред R показва посоката на зависимост: при $R>0$, зависимостта е права, а при $R<0$, зависимостта е обратна. Чрез квадрата на коефициента на корелация R^2 (коефициент на детерминация) сме показали какъв процент от промените във фактора водят до промени в резултативната величина. R^2 и коефициентът на неопределеност K^2 се допълват до единица ($R^2+K^2=100\%$).

На база наличната информация за три години са изследвани зависимостите между факторите, влияещи върху процеса на метанизация, чрез определяне наличието на стохастичната (нефункционална) връзка между получените при изследването данни и два обобщени параметъра – количество на произведения биогаз (Q_{BG}) и степен на разграждане на органичните вещества (S), представени в таблици №18,19,20, чрез установяване на корелационните коефициенти R_1 , R_2 и коефициентите на детерминация R_1^2 и R_2^2 . В таблица №21 е дадена степента на зависимост според стойността на корелационния коефициент R .

Стойностите на коефициента R_1 , дадени в таблицата отразяват корелацията между добива на биогаз (Q_{BG} , $m^3/мес$) и всеки един от технологичните параметри за съответната година: рН, ЛМК, влажност, сухо органично съдържание, количество на заредената утайка, заредено сухо вещество, температура, заредено органично вещество, органично натоварване.

Стойностите на коефициента R_2 , показани в таблицата отразяват корелацията между всеки един от изброените по-горе технологични параметри и степента на минерализация на субстрата ($S, \%$).

Изборът на целевите функции „добив на биогаз“ и „степен на минерализация“, спрямо които са определяни корелационните зависимости на изследваните параметри не е случаен, а е продиктуван от основните цели при третиране на органични утайки в ПСОВ на населени места. Продължителният период на изследванията цели, чрез съпоставка между стойностите на параметрите да бъдат елиминирани случайни грешки в използваната извадка от данни.

Таблица 18. Резултати за връзки на различни параметри на процеса с газодобива и степента на минерализация за 2014 година

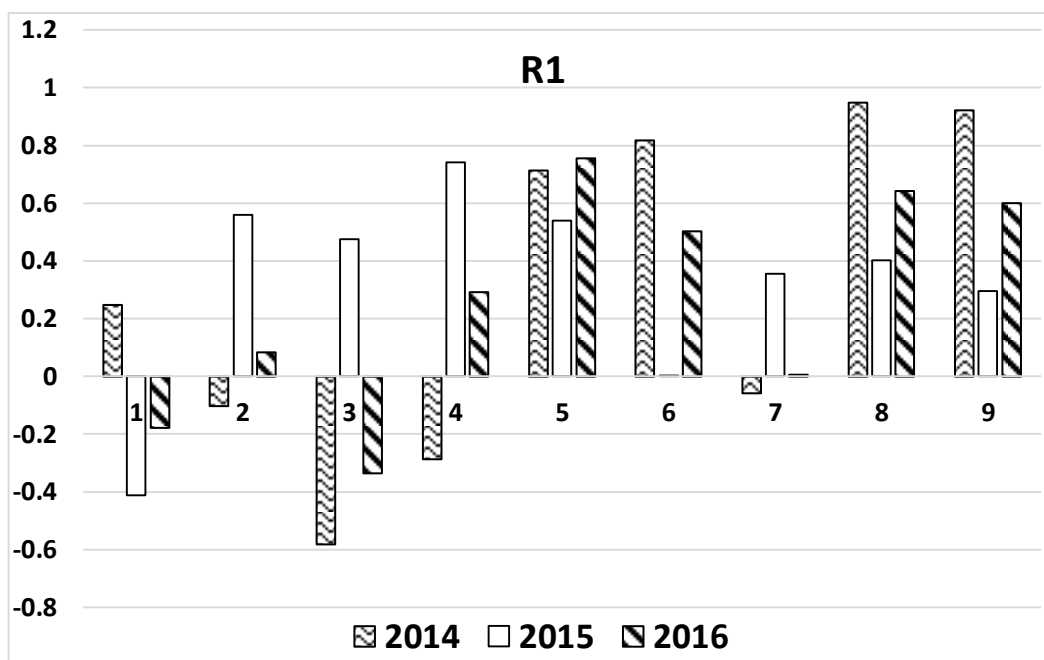
Месец 2014г.	pH	Концентрация, на ЛМК, mgel/l	Влажност W, %	Количество COB в СУ, %	Количество заредена СУ, Q _{СУ} , m ³	Количество заредено сухо вещество СВ, t	Темпе- ратура, T, °C	Количество заредено орг. в-во, Q _{ОВ} , t/мес.	Органично натоварване, kg/(m ³ .d)	Степен на минерали- зация, S, %	Добив на биогаз, Q _{БГ} , m ³ /мес.
1	5,7	19,42	96,1	77,4	39520	1541	37,1	1193,5	1,38	50,2	754900
2	5,6	22,65	95,9	74,3	39690	1627	37,5	1208,4	1,54	45,1	760640
3	5,6	21,65	95,3	71,1	49920	2346	37,4	1668,4	1,92	43,6	984620
4	5,8	17,00	94,6	65,5	48080	2596	37,7	1701,4	2,02	43,0	964506
5	6,2	10,63	95,2	58,7	52340	2512	37,5	1475,2	1,70	56,9	854580
6	6,1	10,94	95,8	63,4	53020	2226	37,8	1410,7	1,68	51,3	850840
7	5,9	14,95	95,3	65,6	52820	2483	38,5	1627,6	1,88	49,5	948550
8	5,9	13,32	95,8	69,6	51140	2148	39,6	1496,0	1,72	56,1	887050
9	6,1	10,36	96,0	66,2	47955	1918	39,3	1269,5	1,51	50,0	815000
10	6,2	8,60	96,1	68,6	50880	1984	37,9	1361,0	1,57	54,9	871273
11	6,3	9,18	96,1	70,3	49840	1944	36,9	1366,7	1,63	50,8	899140
12	6,7	11,67	95,8	70,6	56720	2382	37,0	1682,1	1,94	50,3	965790
R ₁	0,248	-0,103	-0,582	-0,286	0,714	0,818	-0,058	0,948	0,922	-0,235	-
R ₂	0,511	-0,715	0,396	-0,346	0,374	-0,024	0,292	-0,235	-0,363	-	-0,235
R ₁ ²	0,062	0,011	0,339	0,082	0,510	0,669	0,003	0,899	0,850	0,055	-
R ₂ ²	0,261	0,511	0,157	0,119	0,140	0,001	0,085	0,055	0,131	-	0,055

Таблица 19. Резултати за връзки на различни параметри на процеса с газодобива и степента на минерализация за 2015 година

Месец 2015г.	pH	Концентрация, на ЛМК, mgeq/l	Влажност W, %	Количество COB в СУ, %	Количество заредена СУ, Q _{СУ} , m ³	Количество заредено сухо вещество СВ, t	Темпе- ратура, T, °C	Количество заредено орг. в-во, Q _{ОВ} , t/мес.	Органично натоварване, kg/(m ³ .d)	Степен на минерали- зация, S, %	Добив на биогаз, Q _{БГ} , m ³ /мес.
1	6,4	10,67	95,9	73,1	56520	2317	35,9	1693,3	1,95	48,2	992280
2	6,5	8,09	95,8	66,9	48340	2030	34,8	1357,3	1,73	45,0	842740
3	6,5	8,96	95,2	65,3	55760	2676	33,0	1747,7	2,01	45,3	923600
4	6,6	6,96	95,9	62,1	53280	2184	33,4	1356,3	1,62	56,0	795720
5	6,6	10,4	95,5	64,4	55800	2511	38,2	1616,1	1,86	48,7	1020500
6	6,5	11,82	96,3	67,8	53760	1989	40,1	1347,9	1,60	56,0	1009990
7	6,1	13,96	95,9	71,0	54560	2237	41,0	1588,7	1,83	53,4	1034740
8	6,1	11,74	96,1	69,5	54560	2127	41,1	1478,3	1,70	51,8	986806
9	6,0	12,22	96,2	70,2	52800	2006	40,6	1408,2	1,68	50,7	936372
10	6,1	10,07	96,5	69,5	53440	1870	38,1	1299,6	1,50	56,0	977120
11	6,3	11,73	96,0	72,7	53400	2136	37,5	1552,9	1,85	50,1	1131410
12	6,1	9,59	96,2	74,0	56640	2152	35,5	1592,5	1,83	57,4	1164600
R ₁	-0,412	0,559	0,475	0,741	0,54	0,001	0,356	0,401	0,296	-0,086	-
R ₂	0,431	0,001	-0,429	0,039	0,317	0,698	-0,269	0,679	0,726	-	-0,086
R ₁ ²	0,170	0,312	0,226	0,549	0,292	0,000	0,127	0,161	0,088	0,007	-
R ₂ ²	0,186	0,0001	0,184	0,002	0,100	0,487	0,072	0,461	0,527	-	0,007

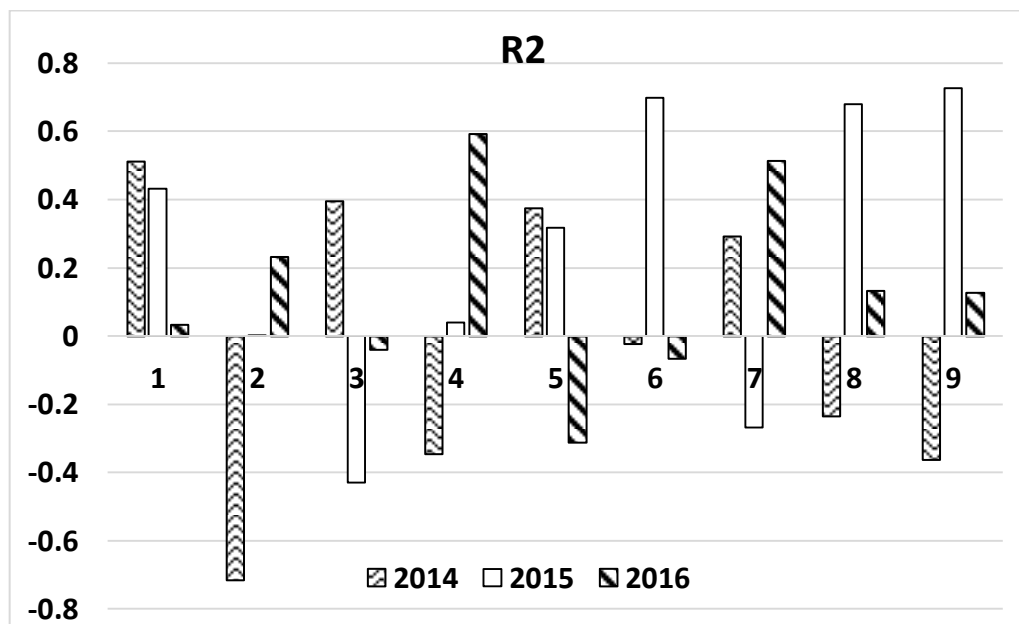
Таблица 20. Резултати за връзки на различни параметри на процеса с газодобива и степента на минерализация за 2016 година

Месец 2016г.	pH	Концентрация, на ЛМК, mgeq/l	Влажност W, %	COB в СУ, %	Количество заредена СУ, Q _{СУ} , m ³	Количество заредено сухо вещество СВ, t	Температура, Т, °С	Количество заредено орг. в-во, Q _{ОВ} , t/мес.	Органично натоварване, kg/(m ³ .d)	Степен на минерализация, S, %	Добив на биогаз, Q _{БГ} , m ³ /мес.
1	6,4	6,97	96,0	69,2	56800	2272	33,6	1572,2	1,81	47,1	1090960
2	6,4	6,14	96,3	68,3	51040	1888	34,1	1289,5	1,59	50,3	960360
3	6,4	6,85	95,9	66,0	56000	2296	34,1	1515,4	1,75	44,1	941060
4	6,1	11,57	95,0	68,7	57040	2852	38,0	1959,3	2,33	49,2	1156180
5	6,1	9,27	95,4	65,8	58320	2683	38,8	1765,4	2,03	49,4	1084918
6	5,7	16,50	94,1	64,4	57600	3398	40,8	2188,3	2,61	48,1	1094908
7	5,5	16,33	94,8	67,7	58560	3045	41,5	2061,5	2,49	46,9	1075714
8	5,7	14,61	95,5	67,3	55320	2490	41,8	1675,8	1,93	51,0	956820
9	6,2	13,69	95,5	73,3	50560	2275	42,2	1667,6	1,99	53,5	904280
10	6,1	12,29	95,1	71,2	56880	2787	41,0	1984,3	2,29	56,1	1159680
11	6,2	11,17	95,5	73,3	56200	2529	39,2	1853,8	2,21	53,5	1146585
12	6,0	9,84	95,8	75,2	59400	2495	36,5	1876,2	2,16	49,8	1195240
R ₁	-0,178	0,083	-0,336	0,292	0,755	0,503	0,006	0,643	0,600	0,172	-
R ₂	0,033	0,232	-0,040	0,592	-0,312	-0,066	0,513	0,132	0,127	-	0,172
R ₁ ²	0,032	0,007	0,113	0,085	0,570	0,253	0,000	0,413	0,360	0,029	-
R ₂ ²	0,001	0,054	0,002	0,350	0,098	0,004	0,263	0,018	0,016	-	0,029



Фиг.11. Сравнение корелационния коефициент R_1 за три години (2014, 2015 и 2016), при целева функция „количество по получения биогаз“.

На графиката: 1-рН, 2-Концентрация на ЛМК, 3-Влажност СОВ в СУ, 4-Съдържание на о.в. в СУ, 5-Количество на заредената утайка, 6-Количество заредено сухо вещество, 7-Температура, 8-Количество заредено органично вещество, 9-Органично натоварване.



Фиг.12. Сравнение корелационния коефициент R_2 за три години (2014, 2015 и 2016), при целева функция „степен на минерализация на субстрата“.

На графиката: 1-рН, 2-Концентрация на ЛМК, 3-Влажност СОВ в СУ, 4-Съдържание на о.в. в СУ, 5-Количество на заредената утайка, 6-Количество заредено сухо вещество, 7-Температура, 8-Количество заредено органично вещество, 9-Органично натоварване.

Таблица 21. Степен на зависимост според стойността на корелационния коефициент R

Стойност на R	Сила (степен) на зависимост
R=0	Липсва зависимост
До 0,3	Слаба
От 0,3 до 0,5	Умерена
От 0,5 до 0,7	Значителна
От 0,7 до 0,9	Голяма
Над 0,9	Много голяма
R=1	Функционална зависимост

При сравняване на усреднените стойности за R_1 и R_2 за трите години на изследването с данните за R от таблица №21 може да се направят следните заключения относно проведения корелационен анализ:

- 1) **Липсват функционална, много голяма и голяма** зависимост между показателя „добив на биогаз“ ($Q_{БГ}$) и измерваните параметри за целия срок на наблюдение.
- 2) Съществува **значителна** зависимост между „добив на биогаз“ и: „заредена сурова утайка“ ($R_1=0,67$), „заредено о.в.“ ($R_1=0,664$) и „органично натоварване“ ($R_1=0,606$).
- 3) Съществува **умерена** зависимост между параметрите „добив на биогаз“ и: „заредено сухо вещество“ ($R_1=0,441$).
- 4) Показателят „добив на биогаз“ зависи **слабо** от концентрацията на ЛМК ($R_1=0,18$), „органично съдържание на суровата утайка“ ($R_1=0,249$) и „температура“ ($R_1=0,101$).
- 5) **Не се установява** съществена зависимост между параметрите „добив на биогаз“ и: рН и „влажност на утайките“.
- 6) **Липсват функционална, много голяма, голяма и значителна** зависимост между показателя „степен на минерализация“ (S) и всеки един от измерваните параметри.
- 7) Показателят „степен на минерализация“ зависи **умерено** от рН ($R_2=0,325$).
- 8) Съществува **слаба** зависимост между показателите „степен на минерализация“ и: „органично съдържание на суровата утайка“ ($R_2=0,095$), „заредена сурова утайка“ ($R_2=0,126$), „заредено сухо вещество“ ($R_2=0,203$), „температура“ ($R_1=0,177$), „заредено органично вещество“ ($R_1=0,192$) и „органично натоварване“ ($R_1=0,163$).
- 9) **Липсва** каквато и да е зависимост между „добив на биогаз“ от една страна, и ЛМК и „влажност“ от друга страна.

1.3.Изводи от резултатите при мониторинга на биогазовата инсталация чрез използване на класически параметри за контрол, през периода 2014-2016 година и на база резултатите от проведения корелационен анализ:

- 1) Биогазовата инсталация функционира най-ефективно, когато се добавя сурова утайка в количества, съобразени със състоянието на ферментационния процес. За тази цел точното състояние на биореактора трябва да бъде известно и документирано за продължителни периоди.
- 2) За контрол на процесите в метантанковете понастоящем се използват различни характерни показатели, измерването на които се извършва чрез отделяне на представителни образци от утайките и обработката им в лабораторни условия. Това

е бавен, трудоемък процес, изискващ участието на висококвалифициран персонал. Понякога резултатите от анализите не са адекватни, вследствие на компрометирани проби, некачествена апаратура или субективни фактори, вследствие на което получените стойности на параметрите остават неразбираеми за операторите.

- 3) Обобщените показатели, характеризиращи основните цели при метанизацията на утайки („добив на биогаз“ и „степен на минерализация“) зависят в различна степен (или съответно не зависят) от измерваните понастоящем параметри на процеса. При направения анализ не може да се посочат малък брой параметри, които да са определящи спрямо обобщените показатели и да могат да послужат, като критерий за състоянието на процеса „анаеробна ферментация“.
- 4) Изложените по-горе причини налагат да се търсят нови параметри, които да могат бързо и пряко да се измерват, да са лесни за тълкуване, и които да могат да послужат като критерий за оценка на моментното състояние на ферментационния процес в биореакторите. Проблемът е актуален и е коментиран от редица изследователи, но до момента не е намерил своето решение.

2. Изследване на възможностите за контрол на процесите при добива на биогаз в ПСОВ чрез използване на „нетрадиционни“ показатели.

2.1. Изследване относно приложимостта на отношението FOS/TAC, като критерий за контрол на процеса „метанизация“ на утайките в ПСОВ.

2.1.1. Получени резултати от изследването чрез метода „FOS/TAC“

Изследването е проведено през 2014, 2015 и 2016 г. в СПСОВ, при третиране на утайки в едностепенни хомогенни мезофилни метантанкове без отделяне на утайкова вода. При производството на биогаз в ПСОВ, проблем са периодичните сезонни, промени на изходния материал, околната температура, както и неподлежащите на планиране количества на дъждовните води. Непрекъснатият режим на действие изисква съвременна реакция за поддържане на технологичния регламент, чрез бързо определяне на вариациите в състава на различните субстрати. Чрез прилаганите до сега методи се определят множество параметри, чието измерване е скъпо и отнема значително време.

Целта на изследването е да се установи приложимостта на метода FOS/TAC за контрол на процеса „анаеробна ферментация“ на органични утайки от отпадъчни води на населени места. Съотношението FOS/TAC е признато като показател за оценка при ферментационния процес на оборски тор, но досега не е намерило практическо приложение при метанизация на утайките в ПСОВ. За разлика от другите начини за контрол, чрез този метод състоянието на процеса „анаеробна ферментация“ може да се определя сравнително лесно и непрекъснато. Резултатът е стойност, равна на отношението между два параметъра: FOS (Flüchtige Organische Säuren) – съответства на съдържанието на летливите органични киселини и TAC (Totales Anorganisches Carbonat) – показател за буферния капацитет на изследваната проба. Отношението FOS/TAC може да се определи чрез ръчно или автоматично титруване, при което автоматичният метод спестява време при еднаква степен на точност. Друго предимство на метода е, че показателят може да бъде определен извън лабораторията в условията на работеща инсталация. Чрез получените резултати са пресметнати усреднените месечни стойности за показателите.

В резултат на изследването са получени данни за: рН на субстрата; ТАС изразено в mgCaCO_3/l ; FOS изразено в $\text{mgCH}_3\text{COOH}/\text{l}$; отношение FOS/ТАС в части от единицата. Изследванията са извършени съгласно добрите лабораторни практики, при спазване на стойностите на параметрите, дадени в таблица №22.

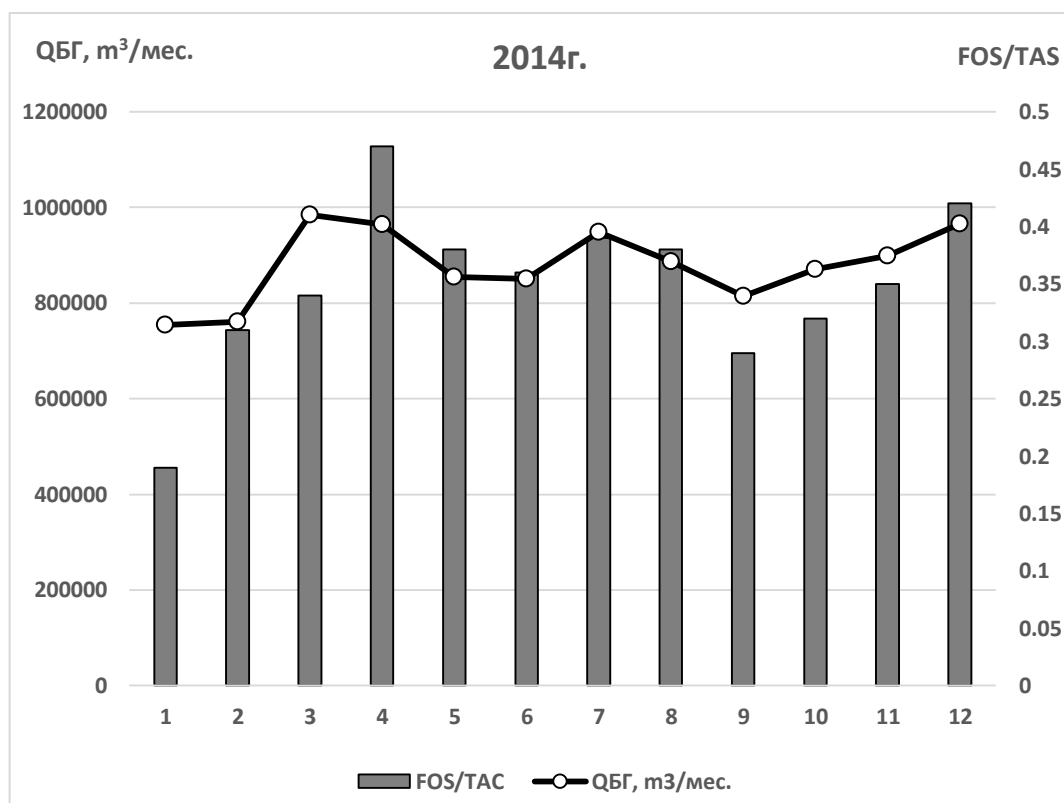
При стойности на съотношението FOS/ТАС в интервала $[0,3 \div 0,4]$, анаеробното разграждане протича стабилно. При съотношение под 0,3 инсталацията е недостатъчно захранена и количеството на суровата утайка трябва да се увеличи. Стойност по-голяма от 0,4 е показател за началото на „разстройство“ в процеса.

Таблица 22. Стойности на параметрите при определяне на FOS/ТАС

Параметър	Единица	Стойност
Изследвано количество	ml	5
Температура, при която е извършен анализа	°C	25
Стандартно отклонение за FOS/ТАС	%	0,8
Стандартно отклонение за рН	%	2,65
Концентрация на титранта	eq/l	0,1
Време за разбъркване	s	15
Скорост на разбъркване	%	25
Максимално време на стабилност	s	120
Критерий за стабилност	pH/min	0,05

Таблица 23. Стойности на рН, FOS, ТАС, FOS/ТАС и корелационния коефициент (R) за 2014 г.

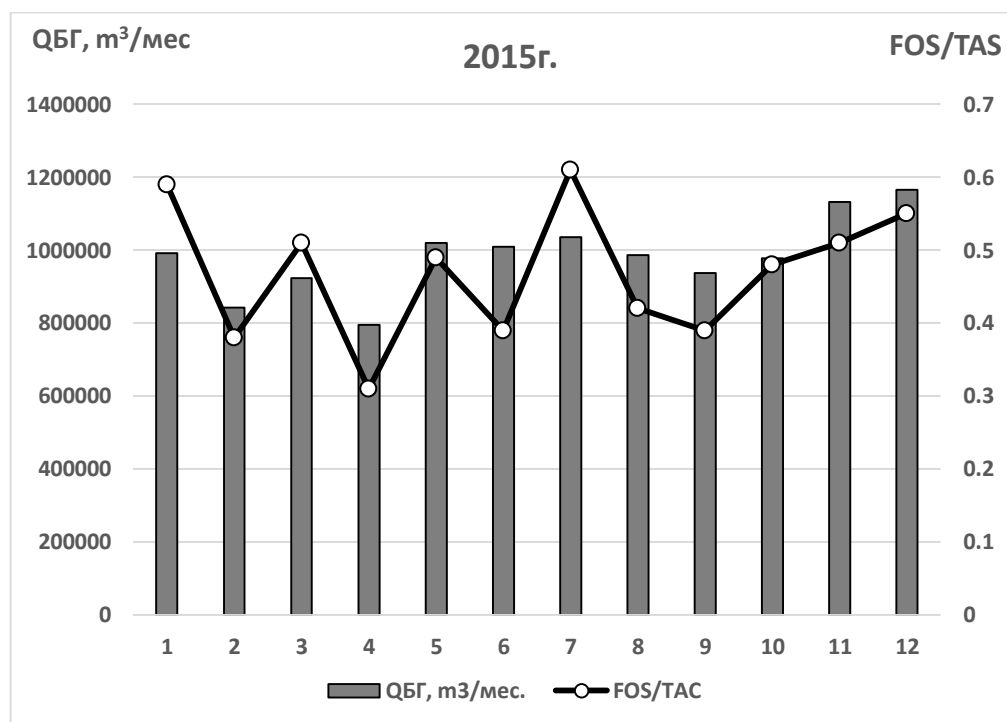
Параметър Месец 2014 г.	рН	ТАС, mg/l	FOS, mg/l	FOS/ТАС	Степен на минерализация, S, %	Добив на биогаз, Q _{БГ} , m ³ /мес.
I	7,2	5,63	1,07	0,19	50,2	754900
II	7,3	4,94	1,53	0,31	45,1	760640
III	7,3	5,03	1,71	0,34	43,6	984620
IV	7,1	4,23	1,99	0,47	43,0	964506
V	7,4	4,53	1,72	0,38	56,9	854580
VI	7,4	4,61	1,66	0,36	51,3	850840
VII	7,4	4,79	1,87	0,39	49,5	948550
VIII	7,5	4,55	1,73	0,38	56,1	887050
IX	7,5	4,28	1,53	0,29	50,0	815000
X	7,7	4,94	1,58	0,32	54,9	871273
XI	7,7	4,68	1,64	0,35	50,8	899140
XII	7,7	4,60	1,93	0,42	50,3	965790
R	-	-	-		-0,101	0,746



Фиг.13. Сравнение между добива на биогаз и параметъра FOS/TAC за 2014 г.

Таблица 24. Стойности на pH, FOS, TAC, FOS/TAC и корелационния коефициент (R) за 2015 г.

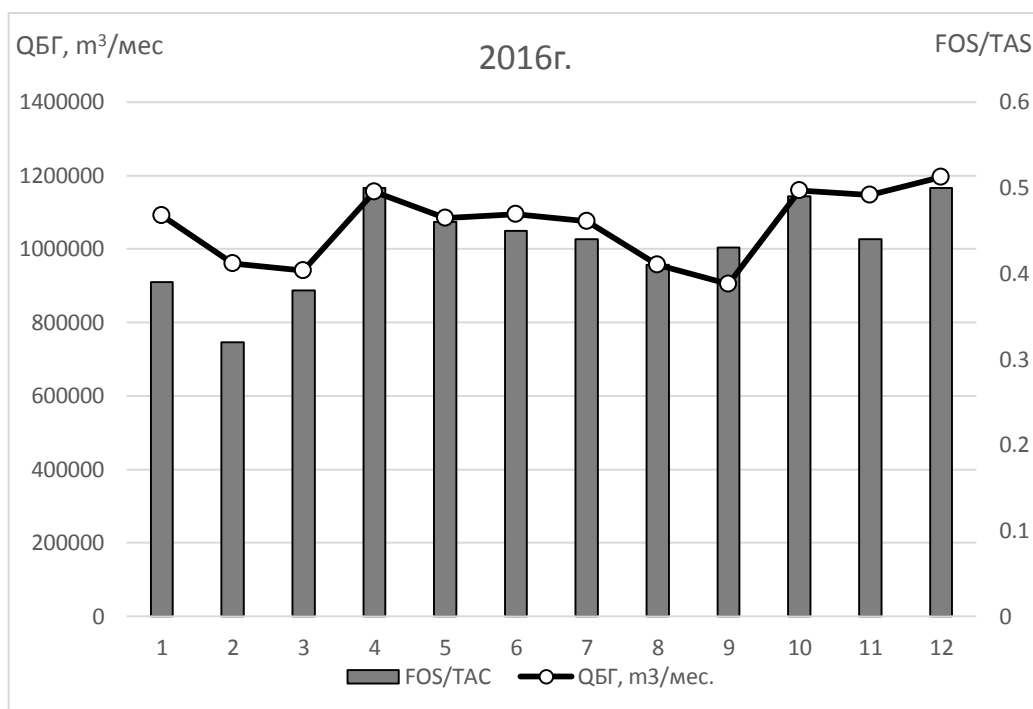
Параметър Месец 2015 г.	pH	TAC, mg/l	FOS, mg/l	FOS/TAC	Степен на минерали- зация, S, %	Добив на биогаз, QБГ, m³/мес.
I	7,5	3,08	1,82	0,59	48,2	992280
II	7,4	3,21	1,22	0,38	45,0	842740
III	7,4	3,05	1,56	0,51	45,3	923600
IV	7,5	3,77	1,17	0,31	56,0	795720
V	7,5	3,24	1,59	0,49	48,7	1020500
VI	7,6	3,91	1,52	0,39	56,0	1009990
VII	7,6	3,02	1,84	0,61	53,4	1034740
VIII	7,7	3,78	1,59	0,42	51,8	986806
IX	7,4	3,97	1,55	0,39	50,7	936372
X	7,5	3,27	1,57	0,48	56,0	977120
XI	7,7	3,53	1,80	0,51	50,1	1131410
XII	7,5	3,42	1,88	0,55	57,4	1164600
R	-	-	-	-	-0,097	0,672



Фиг.14. Сравнение между добива на биогаз и параметъра FOS/TAC за 2015 г.

Таблица 25. Стойности на pH, FOS, TAC, FOS/TAC и корелационния коефициент (R) за 2016 г.

Параметър Месец 2016 г.	pH	TAC, mg/l	FOS, mg/l	FOS/TAC	Степен на минерали- зация, S, %	Добив на биогаз, QBG, m³/мес.
I	7,2	4,67	1,82	0,39	47,1	1090960
II	7,2	4,94	1,58	0,32	50,3	960360
III	7,2	4,63	1,76	0,38	44,1	941060
IV	7,3	4,62	2,31	0,50	49,2	1156180
V	7,2	4,37	2,01	0,46	49,4	1084918
VI	7,3	4,82	2,17	0,45	48,1	1094908
VII	7,2	4,61	2,03	0,44	46,9	1075714
VIII	7,2	4,71	1,93	0,41	51,0	956820
IX	7,4	4,53	1,95	0,43	53,5	904280
X	7,4	4,23	2,07	0,49	56,1	1159680
XI	7,4	4,48	1,96	0,44	53,5	1146585
XII	7,3	4,46	1,73	0,50	49,8	1195240
R	-	-	-	-	0,313	0,730



Фиг.15. Сравнение между добива на биогаз и параметъра FOS/TAC за 2016 г.

2.1.2. Анализ на резултатите, получени чрез метода „FOS/TAC“

- 1) Безразмерната величина FOS/TAC може да послужи като критерий за оценка на добива на биогаз в ПСОВ.
- 2) Показателят FOS/TAC дава възможност, проблемни процеси да бъдат открити на време и да се предприемат мерки за предотвратяване на негативните последици.
- 3) Между FOS/TAC и състоянието на процеса съществува връзка, показана в таблица №26.

Таблица 26. Връзка между FOS/TAC и състоянието на процеса

Стойност на FOS/TAC	Състояние на процеса	Предложения за коригиращи мерки
> 0,6	Свърхпредозиране в хранването	Спиране на зареждането
0,5-0,6	Предозиране при хранването	Снижаване на органичния товар
0,4-0,5	Инсталацията е напълно хранена	Стриктен контрол на процеса
0,3-0,4	Хранването е оптимално	Поддържане на това ниво
0,2-0,3	Хранването е недостатъчно	Плавно увеличаване на хранването
<0,2	Хранването е крайно малко	Бързо увеличаване на хранването

2.2.Изследване приложимостта на показателя CST като критерий за контрол на процеса „метанизация“ на утайките в ПСОВ.

2.2.1. Получени резултати от изследването чрез използване на метода „CST“

Целта на изследването е да се установи приложимостта на метода „време за капилярно просмукване“ (*Capillary suction time – CST*) за контрол на процеса „анаеробна ферментация“ на органични утайки от отпадъчни води на населени места.

Таблица 27. Динамичен вискозитет на водата при различни температури (0÷40°C).

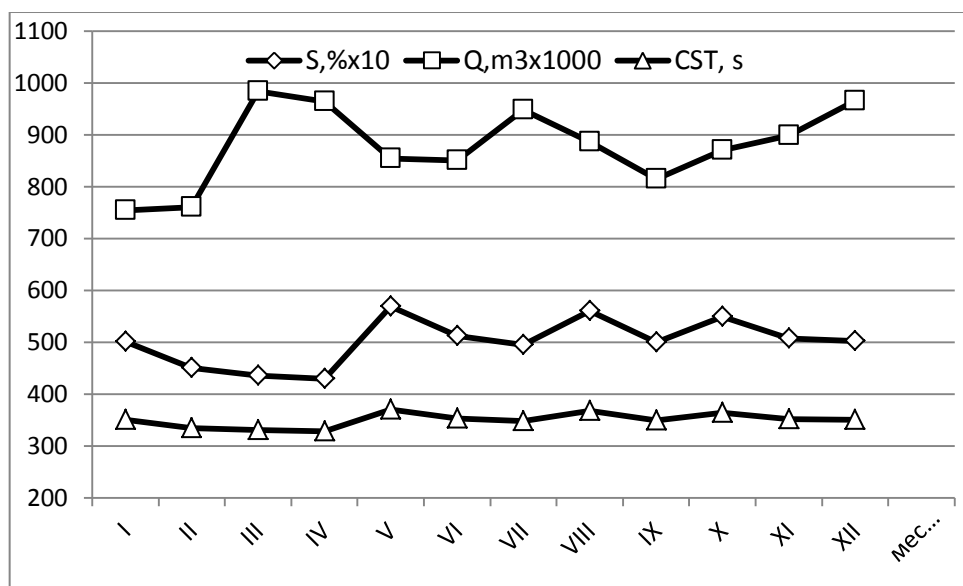
T°C	$\mu \cdot 10^{-3}$, Pa.s	T°C	$\mu \cdot 10^{-3}$, Pa.s
1	1,7313	21	0,9810
2	1,6728	22	0,9579
3	1,6191	23	0,9358
4	1,5674	24	0,9142
5	1,5188	25	0,8937
6	1,4728	26	0,8737
7	1,4284	27	0,8545
8	1,3860	28	0,8360
9	1,3462	29	0,8180
10	1,3077	30	0,8007
11	1,2713	31	0,7840
12	1,2663	32	0,7679
13	1,2028	33	0,7523
14	1,1709	34	0,7371
15	1,1404	35	0,7225
16	1,1111	36	0,7085
17	1,0828	37	0,6947
18	1,0559	38	0,6814
19	1,0299	39	0,6685
20	1,0050	40	0,6560
20,2	1,0000	0	1,7921

Резултатите са представени в таблица №28. Резултатите, различаващи се с над 20% от средната стойност са изключвани и тя е изчислявана отново. Минималният брой на валидните стойности е три.

Таблица 28. Измерени стойности на CST в секунди

Резултат Месец	2014 г.		2015 г.		2016 г.	
	Измерено	Средна стойност	Измерено	Средна стойност	Измерено	Средна стойност
I	343 349 361	351	339 347 342	343	351 332 339	341
II	333 331 341	335	329 336 341	335	359 346 352	352
III	322 329 342	331	335 340 332	336	331 338 337	336
IV	324 327 335	329	357 369 376	368	340 351 354	348
V	365 379 369	371	351 338 348	346	357 346 350	351
VI	346 363 351	353	359 369 375	368	349 338 344	344
VII	342 356 347	348	351 365 362	359	332 341 348	340
VIII	378 362 363	368	364 353 349	355	361 349 352	354
IX	359 341 346	349	344 360 356	353	361 365 354	360
X	359 372 363	365	356 372 375	368	374 370 362	369
XI	345 349 361	352	355 362 345	354	359 356 368	361
XII	350 344 358	351	377 364 368	370	352 361 345	353

На фиг.16 графично е изследвана динамиката на показателя CST и обобщените параметри: степен на минерализация (S) и количество на произведения биогаз през 2014 г.

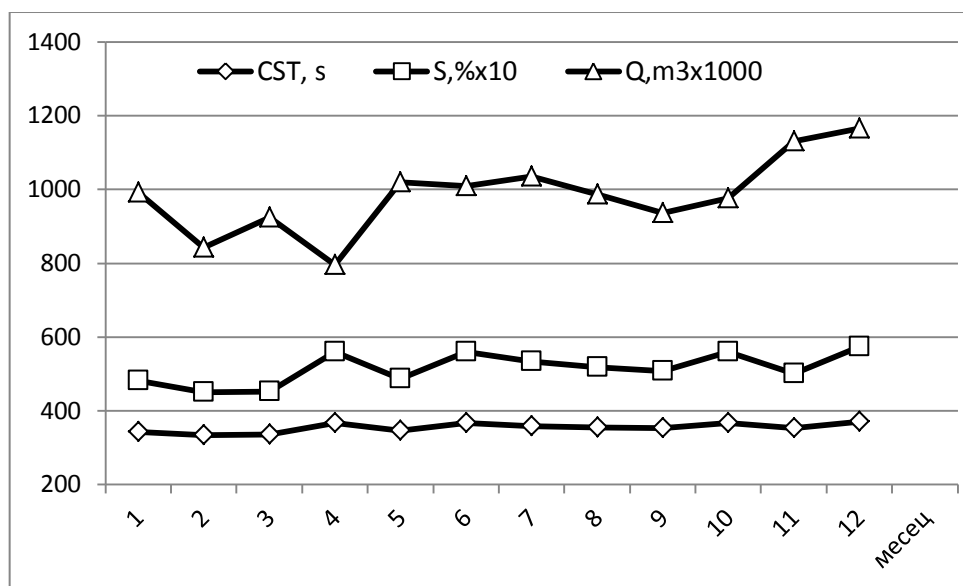


Фиг.16. Динамика на CST, S и Q_{БГ} през 2014 г.

Таблица 29. Стойности на CST, S и Q_{БГ} за 2014 г.

Показател Месец	CST	S, %	Q _{БГ} , m ³ /мес.
I	351	50,2	754900
II	335	45,1	760640
III	331	43,6	984620
IV	329	43,0	964506
V	371	56,9	854580
VI	353	51,3	850840
VII	348	49,5	948550
VIII	368	56,1	887050
IX	349	50,0	815000
X	365	54,9	871273
XI	352	50,8	899140
XII	351	50,3	965790
R	-	0,97	-0,230

На фиг.17 графично е изследвана динамиката на показателя CST и обобщените параметри: степен на минерализация и количество на произведения биогаз през 2015 г.

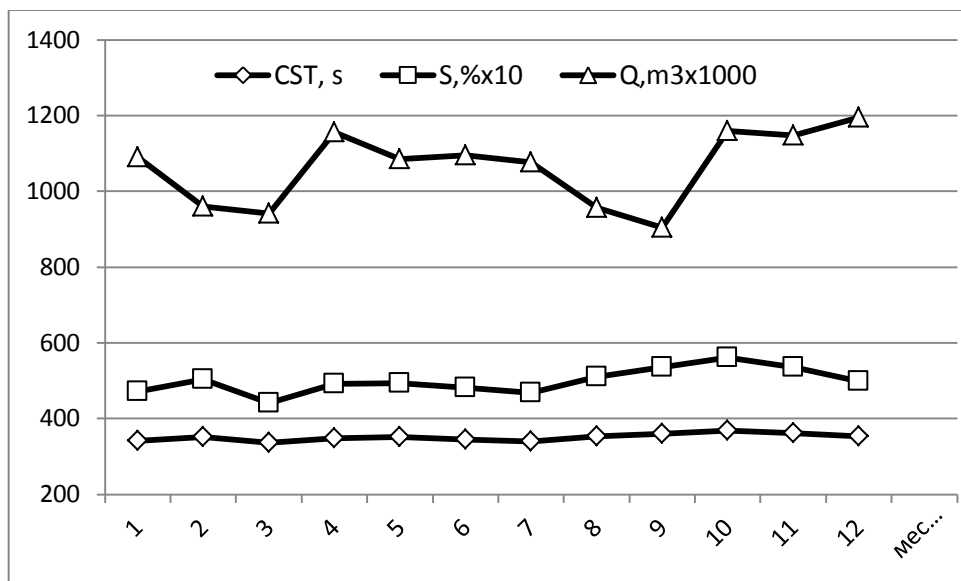


Фиг.17. Динамика на CST, S, QБГ за 2015 г.

Таблица 30. Стойности на CST, S и QБГ за 2015 г.

Показател Месец	CST	S, %	QБГ, m³/мес.
I	343	48,2	992280
II	335	45,0	842740
III	336	45,3	923600
IV	368	56,0	795720
V	346	48,7	1020500
VI	368	56,0	1009900
VII	359	53,4	1034740
VIII	355	51,8	986806
IX	353	50,7	936372
X	368	56,0	977120
XI	354	50,1	1131410
XII	370	57,4	1164600
R	-	0,94	0,291

На фиг.18 графично е изследвана динамиката на показателя CST и и обобщените параметри: степен на минерализация и количество на произведения биогаз през 2016 г.



Фиг.18. Динамика на CST, S и Q_{БГ} през 2016 г.

Таблица 31. Стойности на CST, S и Q_{БГ} за 2016 г.

Показател Месец	CST	S, %	Q _{БГ} , m ³ /мес.
I	341	47,1	1090960
II	352	50,3	960360
III	336	44,4	941060
IV	348	49,2	1156180
V	351	49,4	1084918
VI	344	48,1	1094908
VII	340	46,9	1075714
VIII	354	51,0	956820
IX	360	53,5	904280
X	369	56,1	1159680
XI	361	53,5	1146585
XII	353	49,8	1195240
R	-	0,98	0,182

2.2.2. Анализ на резултатите, получени чрез метода „CST“

- 1) Времето за капилярно просмукване се измерва бързо и лесно с конструираната апаратура, както в лабораторни условия, така и на терен.
- 2) Освен за ферментационни утайки, методът е приложим за всякакви суспензии.
- 3) Измерванията на CST трябва да се извършват след снижаване на температурата под 30°C. При температура над посочената, резултатът се коригира по формула (9).
- 4) Допустимото стандартно отклонение при последователно извършените измервания варира от минимална точност (максимална неточност) – 20 s (6%), до максимална точност (минимална неточност) – 7 s (2,1%).
- 5) При интерпретирането на всеки един от измерените резултати трябва да се вземе предвид, че съществува реална възможност за влияние на страната, с която филтърната хартия се поставя нагоре.
- 6) Относно динамиката на параметрите CST, S и Q_{БГ} могат да се направят следните заключения:
 - Между времето за капилярно просмукване CST и добива на биогаз Q_{БГ} не се наблюдава наличие на зависимост;
 - Между времето за капилярно просмукване CST и степента на минерализация S съществува силна положителна корелационна зависимост (0,94-0,98).
- 7) Параметърът CST може да се прилага за оценка на степента на стабилизация на утайките и от там – за времето за престояване в биореактора.
- 8) Класирането на различните утайки, направено по стойността на CST може да се използва и като косвен показател за определяне разхода на реагенти при кондиционирането на суспензиите преди тяхното обезводняване.

3. Метод за оразмеряване на хомогенни отопляеми едностъпални биореактори за метанизация на утайките в ГПСОВ

Поради липса на научно обоснована практическа методика, обединяваща санитарно-хигиенната и технико-икономическата оценка на мероприятията, свързани с анаеробната ферментация на утайките, при практическото решаване на проблемите често се подхожда чисто емпирично. Така например в Русия и САЩ обичайната степен на разграждане на биоразградимите вещества в утайките е в рамките на 60÷80% докато препоръчаната от *Imhoff* стойност е 90% (т.н. „техническа степен на изгниване“). Очевидно е, че за нуждите на технологичното проектиране е трудно да се препоръча универсален метод, а за всеки отделен случай формулите трябва да бъдат съобразени с конкретните изисквания. По тази причина са разгледани четири методи и норми за оразмеряване.

3.1.Оразмерителна методика според българските „Норми за проектиране на канализационни системи“

Методиката за технологично оразмеряване на хомогенни отопляеми едностъпални метантанкове се основава на общата формула за определяне на обема:

$$V_{изгн}=(Q/100).\{[C.O/(100.k_1^{cp})]+(C.M/100)+W/k_2^{cp}\}.(T+t_a) \quad (10)$$

където: Q, m³/d е денонощно количество на суровите утайки; O % – органично съдържание на суровите утайки; M % – минерално съдържание на суровите утайки; C % – сух остатък на суровите утайки; W % – влажност на суровите утайки; k₁^{cp} – среден коефициент на

изгниване на органичните вещества; k_2^{cp} – среден коефициент на обезводняване на утайките; T, d – време за изгниване на утайките; t_a, d – време между две последователни изпускания на изгнили утайки.

Времената (T) и (t_a) се избират според средната температура на субстрата, а k_1^{cp} и k_2^{cp} – според органичното съдържание и крайната влажност на утайките. За оразмеряването са необходими параметрите: количество сурови утайки (Q), начална влажност (W), начално съдържание на органични вещества (O), времепрестой за достигане на техническата граница на изгниване, време за акумулиране на утайките (t_a), влажност на изгнилите утайки (W). Времето (T) е реципрочна стойност на скоростта (K), т. е.:

$$T=1/K, d. \quad (11)$$

Коефициентите k_1^{cp} и k_2^{cp} се изчисляват по формулите:

$$k_{1H}^{cp}=100/(100-0,68.R_o^T) \quad (12)$$

$$k_{2H}^{cp}=100/(100-0,68.E_w^T) \quad (13)$$

където: R_o^T , % – техн. граница на разграждане; E_w^T , % – техн. граница на обезводняване.

R_o^T и E_w^T се определят съответно по формулите:

$$R_o^T=m.(1,37.O-32) \% \quad (14)$$

$$E_w^T=100-[W''.(100-W)]/[100.W.(100-W)] \% \quad (15)$$

където: m е съответстващото на температурата релативно газово количество, което се приема по таблица №32; $W''\%$ – влажност на изгнилите утайки.

Таблица 32. Стойности на m за различни температури

$t^{\circ}C$	8	10	12	15	20	25	30	32	53
m	0,52	0,56	0,59	0,66	0,76	0,89	0,95	1,0	1,15

Стойностите на оразмерителните параметри при липса на опитно установени данни се приемат съгласно обобщената таблица №33.

Таблица 33. Стойности на оразмерителните параметри

Изгнивател Параметър	Едностепенен без отделяне на утайкова вода	Едностепенен без отделяне на утайкова вода	Двустепенен	
			I степен	II степен
Тип на изгнивателя	X	X- k_1^{cp} HX- k_2^{cp}		
Вид на утайките	П; П+ББ	П; П+ББ	П; П+ББ	П; П+ББ
O %	60-65;70-75	60-65;70-75	60-65;70-75	Изчислява се
W %	95; 96	95; 96	95; 96	$W=W''$ от Ист.
W'' %	Изчислява се	89; 95	Изчислява се	87; 93
Оразмерителна $t^{\circ}C$	32; 53	32; 53	32	Изчислява се
T, d	20-25; 10-12	20-25;10-12	12-15	8-12
t_a, d	0	0	0	0

За едностепенни метантанкове без отделяне на утайкова вода обемът е:

$$V_{изгн}=Q.(T+t_a), m^3 \quad (16)$$

където $Q, m^3/d$ е обемът на подаваните за изгниване утайки.

Влажността на изгнили утайки от метантанкове без отделяне на утайкова вода е:

$$W''=W/[1-O.R_o^T.(100-W)/1000000] \% \quad (17)$$

където: W % е влажност на суровите утайки; O % е съдържание на органични вещества в суровите утайки; R_o^T , % – техническа граница на разграждане на органичните вещества.

Денонощното количество на отделения при изгниването на утайките биогаз, при липса на опитни данни се определя по формулата:

$$V_{газ} = 0,001.Q.(100-W).O.R_o^T, m^3/d. \quad (18)$$

Стойностите на параметрите се приемат в съответствие с данните в табл.38, а R_o^T се изчислява по познатата формула.

Топлинната мощност на биогаза се определя по формулата:

$$H=359.\delta, kJ/m^3 \quad (19)$$

където δ е процентното съдържание на метан в газовата смес (при липса на данни от измервания за стойността на δ , калоричността на биогаза се приема 23 000 kJ/m³).

При топлотехническите изчисления числените стойности на специфичния топлинен капацитет C_V на утайките се взимат от таблица №34, а числените стойности на коефициента на топлопредаване K за различните материали – от таблица №35.

Таблица 34. Стойности на C_V на утайките

Влажност, %	98	95	92	90
C_V , kJ/(kg.K)	4,13	4,04	3,95	3,89

Таблица 35. Стойности на коефициента на топлопредаване K

Вид на околната среда	Суха почва	Въздух (в зависимост от скоростта на вятъра)	Мокра почва
Коефициент на топлопредаване K , kJ/(m ² .h.K)	2,09	3,13-6,30	5,87

3.2.Оразмерителна методика според руските строителни норми и правила (СН и П 204.03-85)

Съгласно СН и П 204.03-85, метантанковете при мезофилен режим се оразмеряват с дози по обемно натоварване 7÷10%, което съответства на изчислителен времепрестой от 14,3÷10 d и степен на разграждане съответно 45,6÷49% за първични и 36,6÷40% за ИАУ. Обемната доза D_{MT} за всеки конкретен случай се отчита от таблици в зависимост от температурния режим и влажността на утайките. Предвидена е корекция за стойността на дозата при високо съдържание на ПАВ в утайките.

Теоретичната степен за разграждане (R_T) се определя по формулата:

$$R_T=R_{lim}-K.D, \quad (20)$$

където: R_{lim} е максимална степен на разграждане (при липса на данни за състава на утайките $R_{lim}=53\%$ за първични и $R_{lim}=44\%$ за ИАУ); K_p е емпиричен коефициент (при мезофилен режим $K_p=0,72$ за първични утайки и $K_p=0,40$ за ИАУ; за смесени утайки K_p).

Оразмеряването на ферментаторите включва определяне на необходимия обем в зависимост от количеството на суровата утайка. За целта се изчисляват количествата на зареденото сухо и органично вещество.

Сухото вещество в ПУ ($O_{сух}$, t/d) и в ИАУ ($I_{сух}$, t/d), се определя по формулите:

$$O_{cyx}=C_o.Q.E.10^{-6} \quad (21)$$

$$I_{cyx}=[(0,8.C_o.(1-E)+0,3.L_o)-a_m] \quad (22)$$

където: C_o – концентрация на НВ в ПУ, mg/l; E – ефект на задържане на неразтворените вещества в първичните утайтели; Q – дебит на отпадъчната вода, m³/d; L_o – БПК_{пълно} на отпадъчната вода в аерационния басейн; a_m – изнесени НВ от вторичните утайтели, mg/l.

Количеството органика в ПУ ($O_{бз}$, t/d) и ИАУ ($I_{бз}$, t/d), се определя по формулите:

$$O_{бз}=O_{cyx}.(1-3_{oc}) \quad (23)$$

$$I_{бз}=I_{cyx}.(1-3_{ил}) \quad (24)$$

където 3_{oc} и $3_{ил}$ са минералните части съответно на първичната и активната утайки.

Количествата на ПУ (Q_{oc} , m³/d) и ИАУ ($Q_{ил}$, m³/d) при фактическа влажност се определят по формулите:

$$Q_{oc}=O_{cyx}/[(1-P_{oc}).\gamma] \quad (25)$$

$$Q_{ил}=I_{cyx}/[(1-P_{ил}).\gamma] \quad (26)$$

където: P_{oc} , % – влажност на ПУ (93,5÷97%); $P_{ил}$, % – влажност на УИАУ (96,5÷97,5 %); γ – плътност на ПУ и ИАУ (приема се равна на единица).

Общият разход на ПУ и ИАУ по сухо, по органично вещество и като обем, при фактическата влажност се определя по формулите:

$$M_{cyx}=O_{cyx}+I_{cyx}, \text{ t/d} \quad (27)$$

$$M_{бз}=O_{бз}+I_{бз}, \text{ t/d} \quad (28)$$

$$M_{общ}=Q_{oc}+Q_{ил}, \text{ t/d} \quad (29)$$

Средната влажност на смесената ПУ и ИАУ, се определя по уравнението:

$$P_{см}=100.[1-M_{cyx}/(M_{общ}).\gamma], \% \quad (30)$$

Средното минерално съдържание на сухото вещество в смесената първична и ИАУ е:

$$3_{см}=100.[1-M_{бз}/M_{cyx}], \% \quad (31)$$

Обемът на изгнилата утайка при фактическа влажност $M_{сбр}$ се приема равна на $M_{общ}$.

Влажността и минералното съдържание на ферментиралата утайка, се получават по:

$$P_{сбр}=100.\{1-M_{бз}.(1-R_r).(M_{cyx}-M_{бз})/M_{сбр}\}, \% \quad (32)$$

$$3_{сбр}=100.\{1-M_{бз}.(1-R_r)/[M_{бз}(1-R_r)+(M_{cyx}-M_{бз})]\}, \% \quad (33)$$

Необходимият обем на метантанковете се определя в зависимост от количеството на смесената първична и активна утайка при фактическата влажност, по формулата:

$$W=M_{общ}.100/D, \text{ m}^3 \quad (34)$$

където: D , % е денонощната доза на зареждане на метантанка (взима се от таблица №36).

Таблица 36. Денонощна доза на зареждане на метантанка с утайка

Режим на ферментация	Доза на зареждане в метантанка, % при влажност на утайката, %				
	93	94	95	96	97
Мезофилен	7	8	8	9	10
Термофилен	14	16	17	18	19

Полученият биогаз R_r , m³ от 1 kg органично вещество в заредената утайка е:

$$R_r=R_{LIM}-k_r.D \quad (35)$$

където: R_{LIM} е максимално възможно разграждане на органичното вещество в утайката, %; k_r – коефициент, зависещ от влажността на утайката (взема се от таблица №37). Величината R_{LIM} се определя според химическия състав на утайката по формулата:

$$R_{LIM}=100.(0,92.Ж+0,62.У+0,34.Б) \quad (36)$$

където Ж, У, Б са мазнини, въглехидрати и протеини, g в 1g органично вещество. При липса на данни за състава на утайките, се приема: за ПУ $R_{LIM}=53\%$; за ИАУ $R_{LIM}=44\%$.

Таблица 37. Стойности на коефициента k_r

Температура на процеса, °C	Стойности на k_r при влажност на заредената утайка, %				
	93	94	95	96	97
33	1,05	0,89	0,72	0,56	0,40
53	0,455	0,385	0,310	0,240	0,170

Таблица 38. Съдържание на СПАВ в утайките от отпадъчни води, mg/g с.в.

Изходна концентрация на ПАВ в отпадъчните води, mg/l	Съдържание на ПАВ mg/g сухо вещество в утайката	
	Утайка от първичните утаители	Излишна активна утайка
10	9	5
15	13	7
20	17	7
25	20	12
30	24	12

При наличие в отпадъчните води на повърхностно-активни вещества денонощната доза се проверява по формулата:

$$D=10.D_{ПАВ}/[C_{ПАВ}.(100-P_{CM})] \quad (37)$$

където: $C_{ПАВ}$ е съдържание на ПАВ в утайката (определя се по таблица №38); $D_{ПАВ}$ – пределно натоварване с ПАВ на метантанка за денонощие (приема се: 40 g/m³ за алкил-бензолсулфонати; 85 g/m³ за „меки“ и междинни ПАВ; 65 g/m³ – за анионни ПАВ).

3.3.Оразмерителна методика, прилагана в Германия

Методиката за оразмеряване на изгниватели за утайки от отпадъчни води на населени места, дадена в таблица №39 се основава на емпирично установените специфични обеми на изгнивателите в [l/ЕЖ]. Методиката е класическа и се използва в редица страни. В случая са използвани данните за мезофилен режим.

Ако денонощната доза е по-малка от стойностите в таблица №39, необходимо е обемът на метантанка да бъде коригиран за натоварващата доза. Ако денонощната доза е равна или превишава стойностите в таблицата, тогава корекция не се прави.

Полученото количество биогаз от 1 kg сухо органично вещество в утайката при различни температури, според предложената от Imhoff методика, е дадено в таблица №40.

Таблица 39. Специфични обеми на анаеробни стабилизатори според Imhoff

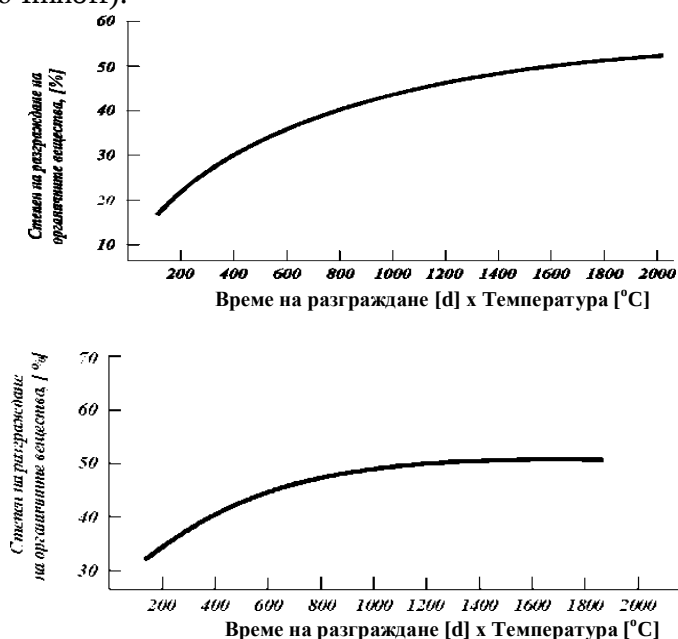
Специфичен обем на изгнивателите, l/Е.Ж.			
Вид на пречиствателната станция	Изгнивателни камери на двуетажни утаители	Разделни изгниватели	
		Мезофилни метантанкове	Открити изгниватели
Механично пречистване	50	20	150
Биологично пречистване с БФ -малко натоварени -много натоварени	75	25	180
	100	30	220
Биологично пречистване с ББ - малко натоварени - много натоварени	150	40	320
	100	35	220

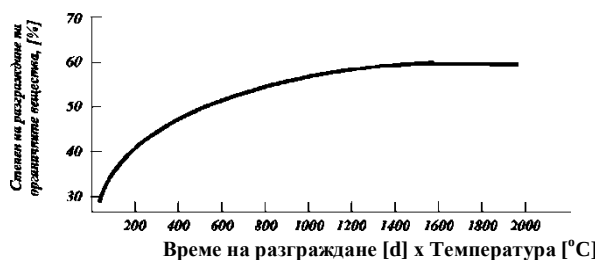
Таблица 40. Специфичен добив на биогаз в зависимост от работната температура

Температура на процеса, °C	10	15	20	25	30
Специфичен газодобив, l/kg ОСВ	275	325	380	440	480

3.4.Оразмерителна методика на Агенцията по опазване на околната среда на САЩ – US EPA (*Sludge Treatment&Disposal,1978; WEF-Manual,1992*).

Методиката се основава на емпирични графични зависимости (фигура №19), между степента на разграждане на органичните вещества и произведението на изчислителния времепрестой и температурата. Методиката се прилага главно в САЩ и Канада. Графични зависимости, подобни на представените на горната фигура са получени в резултат на експериментите на някои изследователи, проведени в полупроизводствени и в производствени условия. Специфичният газодобив при мезофилен режим е 460 l/kg ОСВ (срещу 480 l/kg ОСВ по Imhoff).





Фиг. 19. Графични зависимости за оразмеряване на метантанкове (методика на US EPA) за: а-първична утайка; б-активна утайка; в-смесена утайка в отношение 1:1.

3.5. Сравнителен анализ на разгледаните оразмерителни методики

Разгледаните четири оразмерителни методики, дават възможност за определяне на времепрестоя, съответстващ на дадена степен на стабилизация и на работния обем на биологичния реактор, както и на прогнозните количества на получения биогаз. На базата на проведени изследвания на технологичната схема и капацитета на съоръженията по водната линия в СПСОВ, са пресметнати количествата на суровите утайки и е изготвен материален баланс на инсталацията за третиране и обезводняване на утайките (ТОУ), илюстрирани на фигура №20 и таблица №41. Въз основа на получените от изследването данни са пресметнати следните технологични показатели:

DS_1 – денонощно количество на сухо вещество (*dry substance*) в първичната утайка;

DSP_1 – процентно съдържание на сухото вещество в ПУ (*dry substance percentage*);

Q_2 – количество на първичната утайка за денонощие;

DS_2 – количество на сухото вещество в ИАУ;

DSP_2 – процентно съдържание на сухото вещество в ИАУ;

Q_2 – денонощно количество на ИАУ;

DS_3 – денонощно количество на сухото вещество в уплътнената ИАУ;

DSP_3 – процентно съдържание на сухото вещество в УИАУ;

Q_3 – денонощно количество на УИАУ, m^3/d ;

DS_4 – денонощно количество на сухото вещество в сгъстената УИАУ;

DSP_4 – процентно съдържание на сухото вещество в СУИАУ;

Q_4 – денонощно количество на СУИАУ;

DS_5 – денонощно количество на сухото вещество в смесената сурова утайка;

DSP_5 – процентно съдържание на сухото вещество в ССУ;

Q_5 – денонощно количество на ССУ;

VSP_5 – процент на органичното сухо вещество в ССУ (*volatile solids percentage*);

VS_5 – денонощно количество на органичното сухо вещество в ССУ;

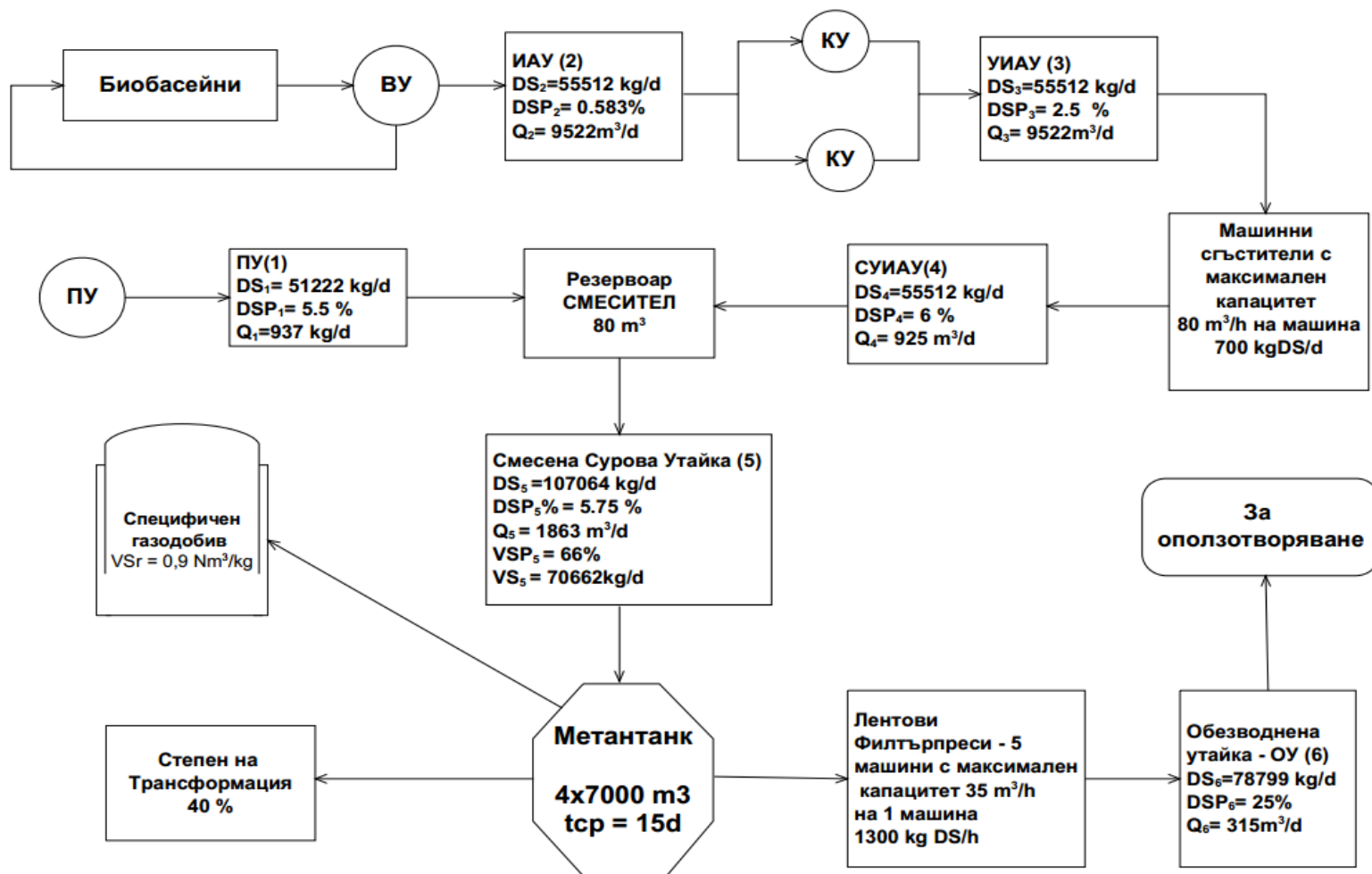
t_{cp} – среден времепрестой на утайките в реактора;

VS_r – специфичен газодобив (газов бонитет на органичната материя), Nm^3/kg ;

DS_6 – денонощно количество на сухото вещество в обезводнената утайка;

DSP_6 – процентно съдържание на сухото вещество в ОУ;

Q_6 – денонощно количество на ОУ.



Фиг. 20. Материален баланс на инсталацията за биогаз в СПСОВ

Таблица 41. Материален баланс на суровите утайки в СПСОВ

Показател Вид утайка	Сухо вещество, kg/d	Влажност, %	Обем на утайката, m³/d	Органично съдържание, %	Органично сухо вещество, kg/d
Смесена сурова (ПУ+СУИАУ)	107 064	94,25	1 863	66	70 662

Сравнителният анализ на резултатите, получени по четирите разгледани методики относно анаеробна ферментация на утайките (таблица №42) показва следното:

Таблица 42. Резултати, получени по четирите оразмерителни методики

Технологични параметри при СВ_{су}=5,75 kg/m³	Мерна единица	Оразмерителна методика			
		Български норми	Руски СН и П	US EPA САЩ	Imhoff Германия
Общ обем	m ³	48440	23 290	27 000	18 630
Времепрестой	d	26	12,5	14,5	10
Количество газ	m ³ /d	41300	21260	32500	33920

При оразмеряване на метантанкове, третиращи смесени утайки резултатите по различните методики се различават значително. Методиката по българските Норми за проектиране на канализационни системи дава много голям времепрестой, тъй като същият е съобразен с висока степен на минерализация на утайките. Методиката на Имхоф препоръчва само специфичния изгнивателен обем, който в съчетание с броя на жителите определени по нормата за първични утайки определя по-малък времепрестой. Методиката на руските СН и П дава престой по-висок с 25% от немските норми, а американските определят по-продължителен престой с 45% спрямо немската методика. Газовите количества при различните методи за оразмеряване за еднакви обеми и качествени параметри на утайките не нарастват с увеличаване на времепрестоя, както логично би трябвало да се очаква – при немската методика се получава по-голям газодобив при по-малък времепрестой, спрямо руските и американските норми.

Посочените разлики дават основание да се търси по-усъвършенстван подход при съставянето на новата методика.

3.6.Предлагана нова обобщена методика за оразмеряване на едностепенни хомогенни метантанкове без отделяне на утайкова вода

С оглед на обстоятелството, че в съвременната практика на ПСОВ в Р. България, утайките се третират в едностепенни хомогенни метантанкове без отделяне на утайкова вода, общият работен обем на реакторите в предлаганата от нас методика се определя по формула с ниска степен на сложност, която дава достатъчно добри резултати:

$$V=Q.(T+t), m^3 \quad (38)$$

където: Q , m^3/d е денонощният дебит на суровата утайка; T , d – необходимият времепрестой за достигане желаната степен на разграждане; t , d – времето между отделните зареждания.

Препоръчителен е непрекъснатият режим на зареждане ($t=0$), откъдето:

$$V=Q.T, m^3 \quad (39)$$

Въз основа на изчислените стойности по четирите разгледани методики и на базата на проведени лабораторни изследвания, препоръчваме време за стабилизиране на утайките $T=14\div 16$ денонощия като оптимална стойност на хидравличен времепрестой в метантанковете.

Както е известно разграждането на утайките е асимптотичен процес, който не се прекратява във времето и за който е необходимо да се намери подходящ критерий, който да определя до каква степен да се разгражда органичната част на утайките. При изготвяне на методиката, за определяне на необходимата степен на деструкция на органиката е възприет подхода на проф. *Roediger*, според който степента на анаеробно разграждане при утайки от битови отпадъчни води се изчислява по формулата:

$$\eta=t.(1+t.k) \quad (40)$$

където: t , d е възрастта на анаеробната утайка; k , d^{-1} – хидролизната скорост на анаеробния процес (хидролизата е лимитиращият процес).

За хомогенни метантанкове с непрекъснато зареждане и без отделяне на утайкова вода стойностите на t и T съвпадат. Средният времепрестой по сухо вещество в напълно размесен реактор е идентичен със средния хидравличен времепрестой. За нормална мезофилна температура и неутрална, до леко алкална среда ($pH=7\div 7,4$), стойността на хидролизната скорост може да се приеме $k=0,25 d^{-1}$.

Крайната изчислена степен на разграждане е произведение от ефективността на разграждане и биоразградимите вещества в утайката:

$$B_u=\eta.(POB) \% \quad (41)$$

където POB е процент на биоразградимите органични вещества в утайките (изследванията в лабораторни условия дават резултат $\eta\approx 55\%$). При избора на (B) , резултатът от изчислението се закръглява към най-близкото по-малко кръгло число – приета степен на разграждане (B_n).

Количеството на разградените органични вещества (OB_p) се определя по формулата:

$$OB_p=OB_{cy}.B_n, kg/d \quad (42)$$

Останалото количество сухо вещество след разграждането (CB_o) е:

$$CB_o=CB_{cy}-OB_p, kg/d \quad (43)$$

При мезофилен режим утайката се загрява средно до $35^\circ C$, като при това трябва да бъдат компенсирани и топлинните загуби на изгнивателите.

Необходимата мощност за подгриване се изчислява по формулата:

$$P_1=V.C_p.(T_p-T_y), kWh/d \quad (44)$$

където: V , m^3 е работният обем на реактора; C_p , $kWh/(m^3.K)$ – специфичен топлинен капацитет при изобарни условия (за органични утайки с влажност $92\div 97\%$, $C_p=1,114$

kWh/d); T_p , К – работна температура на изгнителя; T_{cy} , К – температура на суровата утайка преди реактора.

Необходимата топлинна мощност за компенсиране на топлинните загуби на реактора може да бъде изчислена по следната формула:

$$P_2 = 24 \cdot A \cdot k \cdot (T_p - T_e) / 3600 \text{ kWh/d} \quad (45)$$

където: A , m^2 е топлообменната повърхност на реактора; k , $kJ/(m^2 \cdot K \cdot h)$ – коефициент на топлопренасяне, зависещ от материята на различните среди и дебелината на топлообменния слой; T_p , К – работна температура на реактора; T_e , К – минимална външна температура през студения сезон.

Пълната необходима топлинна мощност е произведение от сумата на мощността за загряване на утайките (P_1) и загубата на топлина (P_2) и коефициента на непредвидени загуби (ψ), при което стойността на ψ може да се приеме $1,01 \div 1,03$:

$$P = (P_1 + P_2) \cdot \psi, \text{ kW/d.} \quad (46)$$

Специфичната продукция на биогаз зависи от характеристиките на утайките и от състава на сухото вещество. Първичните утайки имат високо съдържание на мазнини и белтъчини и специфичната газова продукция е около $1 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ разградено органично вещество. Вторичната утайка е с повишено съдържание на въглехидрати и специфичната газова продукция е около $0,8 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ разградена органика. Тъй като действителният състав на утайките трудно може да бъде определен точно, при съотношения между първичната и излишната активна утайка в границите $0,9 \div 1,1$ се приема стойност на специфичната газова продукция от $0,9 \text{ Nm}^3/\text{kg}$ разградено органично вещество.

В заключение е направена проверка на изработената методика за оразмеряване на метантанкове е извършена чрез заместване на получените данни за параметрите при съставяне на материалния баланс на инсталацията за третиране на утайките в СПСОВ. Резултатите от контролното оразмеряване на изследваната инсталация за биогаз са дадени в таблица №43.

Таблица 43. Резултати от оразмеряването по предлаганата методика

№ по ред	Показател	Означение	Дименсия	Стойност
1	Времепрестой	T	d	15
2	Обем на реактора	V	m^3	28000
3	Ефективност на разграждане	η	%	79
4	Крайна степен на разграждане	$B_{\text{и}}$	%	43,5
5	Приета степен на разграждане	$B_{\text{п}}$	%	40
6	Количество на органичните вещества	ОВ	kg/d	70662
7	Количество на разграденото вещество	ОВ _p	kg/d	28265
8	Необходима обща топлинна мощност	P	kWh/d	62124
9	Продукция на биогаз	Q	m^3/d	25000

V. ЗАКЛЮЧЕНИЯ И ИЗВОДИ

1. За постигане на основната цел на дисертационния труд и задачите произтичащи от нея са изучени обстойно технологичната схема и съоръженията на инсталацията за биогаз в Софийската пречиствателна станция за отпадъчни води. Събраната информация е използвана като основа за изследване на процесите при метанизацията на утайките, отделени в процеса на пречистване на отпадъчните води.
2. За изследване на процеса „анаеробна ферментация“ на утайките е направен избор на класически технологични параметри, на методите за тяхното определяне, и са събрани данни от работата на инсталацията за тригодишен период. Извършен е анализ на данните чрез корелационния метод по отношение на целевите функции „добив на биогаз“ и „степен на минерализация“ в зависимост от влиянието на изследваните технологични параметри. Въз основа на получените резултати от анализа могат да бъдат направени следните заключения и изводи:
 - за контрол на процеса „метанизация“, се използват показатели, мониторингът на които е бавен, трудоемък процес и резултатите не винаги са адекватни;
 - обобщените показатели „добив на биогаз“ и „степен на минерализация“ зависят в различна степен (съответно не зависят) от измерваните параметри при процеса;
 - при пълното охарактеризиране на процеса не могат да се посочат параметри, определящи спрямо обобщените показатели и служещи за адекватни критерии;
 - изложените причини налагат да се търсят нови параметри, които бързо и пряко да се измерват, да са лесни за тълкуване и да послужат като критерии за оценка на моментното състояние на ферментационния процес в биореакторите.
3. Изследвана е приложимостта на отношението FOS/TAC като критерий за оценка на състоянието на процеса. Въз основа на получените резултати могат да бъдат направени следните заключения и изводи:
 - FOS/TAC дава възможност, процеси във фаза предхождаща биологичната инверсия в биореактора да бъдат открити на време и да се предприемат превантивни мерки;
 - установена е висока степен на корелация между стойността на показателя FOS/TAC и показателя „добив на биогаз“ (Q_{BG}), с коефициенти на корелация в диапазона $0,672 \div 0,746$ за период от три последователни години (2014-2016г.);
 - не се установява съществена степен на корелация между стойността на FOS/TAC и показателя „степен на минерализация“ (S), за период от три години (2014-2016г.).
4. Изследвана е възможността за използване на показателя „време за капилярно просмукване (CST) като критерий за оценка на състоянието на процеса. Въз основа на получените данни могат да бъдат направени следните заключения и изводи:
 - времето за капилярно просмукване се измерва бързо и лесно със специално конструираната за целта апаратура, както в лабораторни условия, така и на терен;
 - освен за ферментационни утайки, методът за определяне на времето за капилярно просмукване е приложим за всякакви утаени суспензии;

- показателят CST не може да служи за критерий при количествена оценка на биогаза, получен от утайките в ПСОВ;
 - между „времето за капилярно просмукване“ и „степенна на минерализация“ е налице много голяма положителна корелационна зависимост ($R=0,94\div 0,98$), т.е. CST може да бъде използван като критерий за оценка на S (респ. времепрестоя на утайките в биореактора), а от там и като косвен критерий за разхода на реагенти при кондициониране на утайките.
5. На база съществуващи в световната практика подходи е предложен нов метод за оразмеряване на инсталациите за биогаз в ПСОВ от населени места. Извършена е проверка на методиката чрез заместване със стойности, взети от специално изготвения за целта материален баланс на инсталацията за биогаз в СПСОВ. Въз основа на получените данни могат да бъдат направени следните заключения и изводи:
- предлаганата оразмерителна методика дава пълна възможност за отчитане на основните фактори влияещи върху процеса: органично съдържание на утайките, сухо вещество в суровите и изгнилите утайки, остатъчната част на биоразградимите органични вещества в стабилизирани утайки, температурата и др. Чрез подходяща комбинация на параметрите, отговаряща на качествата на утайките, или подбрана целенасочено е възможно да се постигне действащо технологично решение, обосновано с количествени характеристики;
 - събраните данни за параметрите и реалните газови количества в действащите инсталации се съгласуват с изчислените стойности по предложената методика;
 - предложената оразмерителна методика не е в противоречие с множеството получени данни.
 - получените близки резултати по предложения метод и по други методи, използвани в световната проектантска практика е индикация, че може да се очакват добри резултати при практическото приложение на новата методика.

VI. НАУЧНО-ПРИЛОЖНИ И ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

Резюмирайки проблемите, свързани с метанизацията на утайките, в заключение може да се отбележат следните основни научно-приложни и приложни приноси в дисертационния труд:

1. Установени са стойностите за корелационните коефициенти на характеризиращите процеса „метанизация“ на канализационни утайки типични параметри (рН, алкалност, ЛМК, количества на утайките, температура, влажност, органично съдържание, количество и качество на биогаза, органичен товар, степен на изгниване) по отношение две целеви функции – „добив на биогаз“ (Q_{BG}) и „степен на минерализация“ (S), за период от три години работа на инсталацията за биогаз в СПСОВ.
2. Систематизирана и анализирана е значителна по обем нова информация за динамиката на технологичните параметри на инсталацията за биогаз в СПСОВ за период от три

години (2014-2016г.), като получените резултати, могат да имат значителна практическа полза при експлоатацията на подобен тип инсталации.

3. Предложен е нов критерий за контрол на технологичния процес чрез отношението FOS/TAC, който до момента не е прилаган в практиката при експлоатацията на инсталации за биогаз в ПСОВ от населени места.
4. Предложен е показателят „време за капилярно просмукване“ (CST) като нов критерий за степента на минерализация на утайките. Разработени са нов метод и апаратура за практическото измерване на CST и използването му за установяване на степента на минерализация (S) на утайките в биогазовите инсталации в ПСОВ.
5. Установена е „значителна“ степен на корелация между отношението FOS/TAC и параметъра „добив на биогаз“ ($Q_{БГ}$) и много „много голяма“ корелация между времето за капилярно просмукване (CST) и степента на минерализация на утайките (S).
6. Предложена е нова модифицирана методика за технологично проектиране на инсталации за биогаз с едностепенни метантанкове. Предложеният нов оразмерителен метод дава пълна възможност за отчитане на основните влияещи фактори и показва стойности за оразмерителните обеми на реакторите, значително по-малки спрямо досега използваната българска методика, което естествено води до по-ниски капитални разходи за изграждане.

VII. ПУБЛИКАЦИИ ПО ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД

Rayno Popov, Anatolyi Angelov, Application of the correlation method for estimation of the biomethanation of sludge in municipal wastewater treatment plants, anal. of the “Constantin Brancusi” University of Targu Jiu, Engineering Series, №3/2016, ISSN 1842-4856.

Райно Попов, Анатолий Ангелов, Контрол на процеса на метанизация на утайките в градски пречиствателни станции чрез използване на универсален критерий, Национална научно-техническа конференция с международно участие „Автоматизация в минната индустрия и металургията“ БУЛКАМК'16, XI-XII 2016, ISSN 1314-45347.

Райно Попов, Евгени Крайчев, Определяне на обезводняващите свойства на утайките в градски пречиствателни станции за отпадъчни води, преди и след тяхната метанизация, чрез използване на универсален критерий, Юбилейна международна научно-практическа конференция „Устойчиво развитие-2017“, посветена на 55 години ТУ-Варна, 10-12.06. 2017 г. (под печат).

Райно Попов, Производство и използване на биогаз пречиствателни станции за отпадъчни води от населени места, Издателска къща „Св. Иван Рилски“, София, 2015, ISBN 978-954-353-4.