

ИТОГОВЫЙ ОТЧЕТ

**По результатам научно-исследовательской и опытно-конструкторской
работы
«Испытания и опытная эксплуатация биогазовой установки БГУ-100»**

г. Сафоново, 2017

Список исполнителей:

Руководитель проекта АО «Авангард»

Старший менеджер ОГП

«__»_____ 201_ г.

Г.П. Сорокина

Руководитель проекта ООО «Гильдия М»

Главный технолог

«__»_____ 201_ г.

Е.В. Арбузова

Исполнители проекта:

Оператор БГУ

«__»_____ 201_ г.

В.В. Васенев

Администратор проекта

«__»_____ 201_ г.

А.Э. Васильева

Содержание

Реферат.....	4
1 Объект исследования.....	5
Технические характеристики БГУ-100.....	5
Состав БГУ-100.....	6
Устройство и работа БГУ-100.....	8
Описание и работа устройств БГУ-100.....	9
Общие сведения.....	9
Биореактор.....	9
Система транспортирования (загрузки, перекачивания и выгрузки) субстрата.....	12
Система перемешивания БГУ-100.....	13
Шнековый сепаратор SEPPIG/015/ (SEPCOM).....	13
Система газопереработки и газопотребления.....	14
Система подогрева БГУ-100.....	15
Узел катализации процесса переработки (Пресс-экструдер).....	16
Работа основных устройств БГУ-100. Режимы работы БГУ-100.....	17
Загрузка подготовительной емкости.....	17
Перекачка из подготовительной емкости в основную.....	18
Удаление эффлюента (жидкого биоудобрения) из емкости метаногенеза.....	18
Перемешивание продуктов в емкости подготовки и емкости метаногенеза.....	19
Сепарация эффлюента.....	19
Система газопереработки и газопотребления.....	19
Система генерации тепла и электроэнергии.....	20
Система отопления.....	23
2 Анаэробная биологическая очистка.....	24
2.1 Биоценозы и биохимические процессы при анаэробной очистке.....	24
3 Опытная эксплуатация биогазовой установки БГУ-100.....	40
3.1 Отработка режимов работы БГУ-100.....	41
3.2 Результаты анаэробного сбраживания различных субстратов на БГУ-100. Эффективность технологии.....	44
3.2 Результаты лабораторных анализов, испытания на полях полученных удобрений.....	57
Заключение.....	62
Список литературы.....	64
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	65
1. Технические характеристики БГУ-100 по результатам опытной эксплуатации.....	65
2. Дефектная ведомость систем БГУ-100.....	66
3. Техническое задание на изготовление анаэробного реактора биогазовой установки АР-100.....	70
4. Техничко-коммерческое предложение на поставку биокомплекса утилизации органических отходов БИОКОМ-100.....	84

Реферат

Отчет 66 с., 21 рис., 9 табл., 9 графиков, 18 формул, 5 источников литературы, 4 прил.

БГУ; БИОГАЗОВАЯ УСТАНОВКА; БИОЭНЕРГОКОМПЛЕКС;
БИОГАЗ; ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ПРЕДПРИЯТИЙ; ЭНЕРГОСЕРВИС СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ОБЪЕКТОВ.

Цель работы: отработка режимов БГУ-100, разработка технологии биологического анаэробного сбраживания основных видов органического сырья:

- Навоз КРС;
- Птичий помет;
- Активный ил;
- Фекальные стоки;
- Сложно разлагаемая целлюлоза (костра льна, костра конопли, плевела семян).

1 Объект исследования

Биогазовая установка предназначена для экологически чистой безотходной переработки 27 видов органических отходов (навоз КРС подстилочный и бесподстилочный, свиной навоз, овечий навоз, птичий помет, жировая ткань, отходы с мясобойни, ТБО, фекалии и сточные воды, послеспиртовая барда, биологические отходы производства сахара, силос, картофельная ботва, свекольный жом, свекольная ботва, овощные отходы, зерно, трава, глицерин, пивная дробина, отходы, полученные в процессе уборки ржи, лен и конопля, овсяная солома, клевер, молочная сыворотка, кукурузный силос, мука, хлеб, рыбные отходы); получения энергетических ресурсов (биогаз, электрическая и тепловая энергия); производства экологически чистых органических удобрений содержащих гуминовые вещества; утилизации отходов и улучшения экологической обстановки в зонах производства сельхозпродуктов и их переработки

Технические характеристики БГУ-100

Таблица 1.1 – Производительность БГУ-100

Вид исходного сырья	Объем переработки, т/сут	Выход газа, м ³ /сут	Выход биоудобрений, кг/сутz	Выработка электричества, кВт·ч/сут	Выработка тепла, кВт·ч/сут
Навоз КРС	7	100	750	240	800
Навоз свиной	7	110	750	260	840
Птичий помет	5	90	500	240	780
Навоз овечий	5	90	500	240	780
Сточные воды, активный ил (в смеси с органосодержащей биомассой)	До 5 до 2	До 130	500 500	До 280	До 900

Состав БГУ-100

Биогазовая установка состоит из следующих устройств:

- биореактора, в котором осуществляется брожение биоотходов;
- газгольдеров, предназначенных для сбора и хранения биогаза;
- системы автоматизации, осуществляющей автоматическое (программное) управление процессами сбора, распределения и переработки исходного сырья;
- перемешивающих устройств, предназначенных для перемешивания субстрата;
- насосов дренажных для подачи сырья;
- насосов полупогружных для перекачки субстрата;
- шнекового сепаратора, предназначенного для сепарации субстрата, с целью получения удобрения;
- транспортер для подачи сырья;
- газовый сепаратор для очистки биогаза от жидкостей, конденсата и др. примесей;
- газопоршневая электростанция для получения тепла и электричества из биогаза;
- трубопроводов для подачи воды и перекачки субстрата, а также для отвода биогаза.

Обозначение изделия	Наименование изделия	Кол-во
БГУ-94-00-000	Биореактор	1
№ С-RU.AB98.B.00109	Сертификат соответствия	1
БГУ-100-01-000	Трубопровод БГУ-100	1
ПЭР-50Г	Газгольдер	2
MP-1x550/L-1500/3-56-380B/К-В	Мешалка	3
CM80-50-200/46		
ФГПУ 30/10 (L=3.2 м)	Насос фекальный	2
	Насос полупогружной	2
SEPPIG/015	Шнековый сепаратор	1
	Транспортер	1
СВЦ-8Г-159/6-1	Газовый сепаратор	1
ПЭ-100	Пресс-экструдер	1
СЕНС-СДВ-D-RS485	Датчик избыточного давления	3
ТМ-9201-03	Датчик температуры с гильзой защитной	3
ТХКс-2088-08	Датчик температуры	2
УР-203Ех-15-Ф	Уровнемер радиоволновый	3
Z001042551	рН-датчик Applisens	3
СППКр 17сбнж PN16 DN50	Клапан предохранительный	2
	<i>Автоматическая система управления (АСУ)</i>	1
PH1.0 (0.5-1.2) G18-1-RE-LF	Газовый электрогенератор	1
RECAL Unical 18	Водогрейный котел с газовой горелкой АВГ-3-Вio-2-1-1	1

Устройство и работа БГУ-100

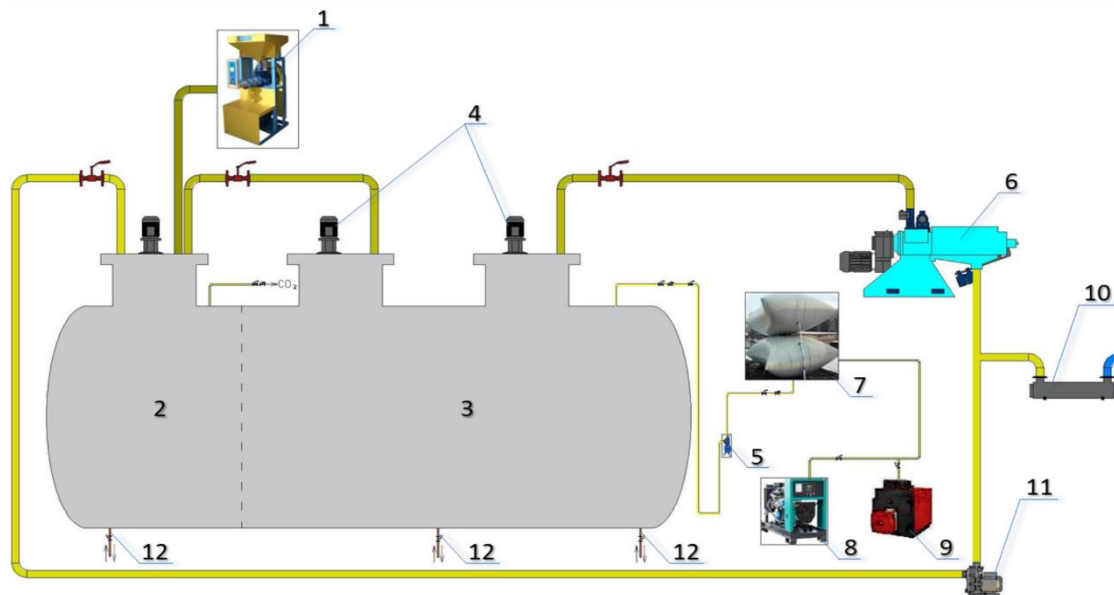


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема работы БГУ-100:

1—пресс-экструдер ПЭ-100; 2—емкость подготовки сырья; 3—емкость сбраживания; 4—электропривод мешалки; 5—сепаратор газа; 6—сепаратор; 7—газгольдер; 8—газопоршневая электростанция; 9—газовый котел; 10—установка обеззараживания; 11—насос регенерационной воды; 12—система трубопроводов теплообмена.

- Принцип работы БГУ-100:

Работа биогазовой установки БГУ-100 предусматривается на навозе КРС. Его переработка производится в два этапа. Первым этапом навоз подается в подготовительную емкость, где для достижения необходимой влажности разбавляется добавочной водой (при первом запуске установки в работу) или регенеративной водой (при циклической работе). Вторым этапом продукт сбраживания перекачивается из подготовительной емкости в емкость метаногенеза, где происходит процесс анаэробной биообработки, в результате которой вырабатывается биогаза (смесь метана и углекислого газа) с последующей его осушкой в сепараторе газа и накоплением в эластичных газгольдерах. Эффлюент (экологически чистое органическое удобрение), влажностью свыше 90% удаляется из емкости метаногенеза и подается в шнековый сепаратор, где происходит его разделение на твердую и жидкую фракции. Твердая фракция – готовое к использованию органическое удобрение, влажностью 40-50%, а жидкая фракция - регенеративной вода, которая в полном объеме возвращается в емкость подготовки субстрата.

ОПИСАНИЕ И РАБОТА УСТРОЙСТВ БГУ-100

Общие сведения

Биореактор

Реактор БГУ-100 (рисунок 2, рисунок 3, рисунок 4) состоит из трех секций. Секции и их кожухи изготовлены из стеклопластика. Секция I (емкость подготовки субстрата) отделена от секции II и секции III (емкость анаэробного сбраживания) перегородкой. Реактор устанавливается на ложементах, оборудуется площадкой обслуживания сверху и лестницами для обеспечения доступа к площадке.

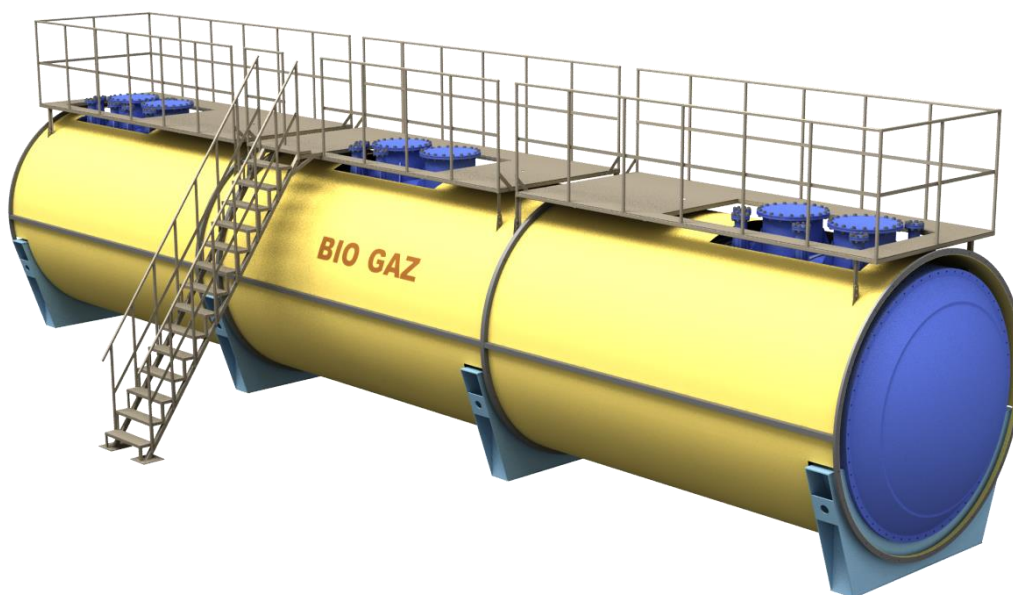


Рисунок 1.2 – Общий вид реактора БГУ-100

Обозначение позиций на рисунке 1.3 и на рисунке 1.4:

1 – секция I; 2 – секция II; 3 – секция III; 4 – кожух для крышки; 5 – кожух для секции I; 6 – кожух для секции II; 7 – кожух для секции III; 8 – ложемент; 9,10,11 – площадка обслуживания; 12 – лестница; 13 – кожух; 14 – обвязка; 15,16 – болты; 17,18,19 – гайки; 20,21 – шайбы; 22,23 – стеклопластик; 24 – термометр сопротивления; 25 – уровнемер; 26 – клапан предохранительный; 27 – труба металлопластиковая; 28 – датчик давления; 29 – рН-датчик; 30 – тройник переходной; 31 – кран шаровый; 32 – трубопровод.

а – люк смотровой; б – входной патрубок субстрата подготовительной емкости; в – патрубок подачи воды в подготовительную емкость; г – установка уровнемера; д – патрубок подачи рекуперационной воды в подготовительную емкость; е – патрубки подачи субстрата из подготовительной емкости в емкость анаэробного сбраживания; ж – патрубки отвода CO_2 и биогаза; з – установка МПУ; и – отвод обратной воды; к – выход рекуперационной жидкости; л – установка датчика давления; м – резервный патрубок.

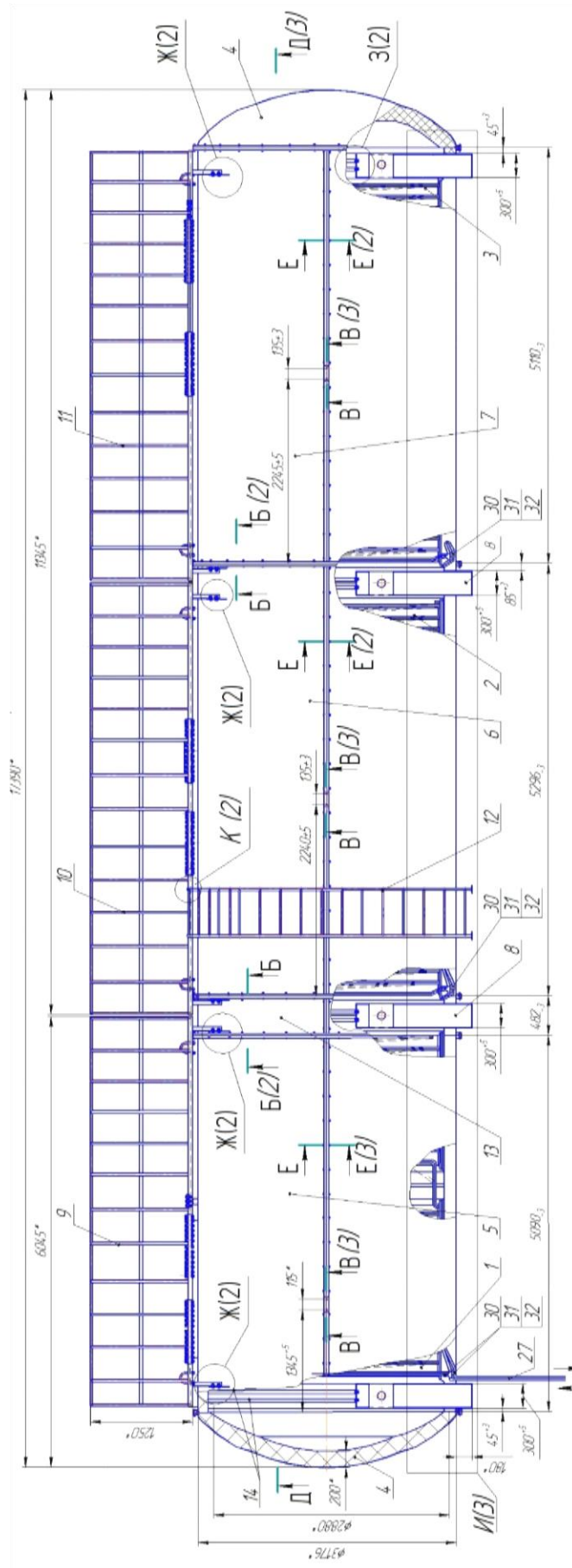


Рисунок 1.3 – Реактор БГУ-100. Вид сверху

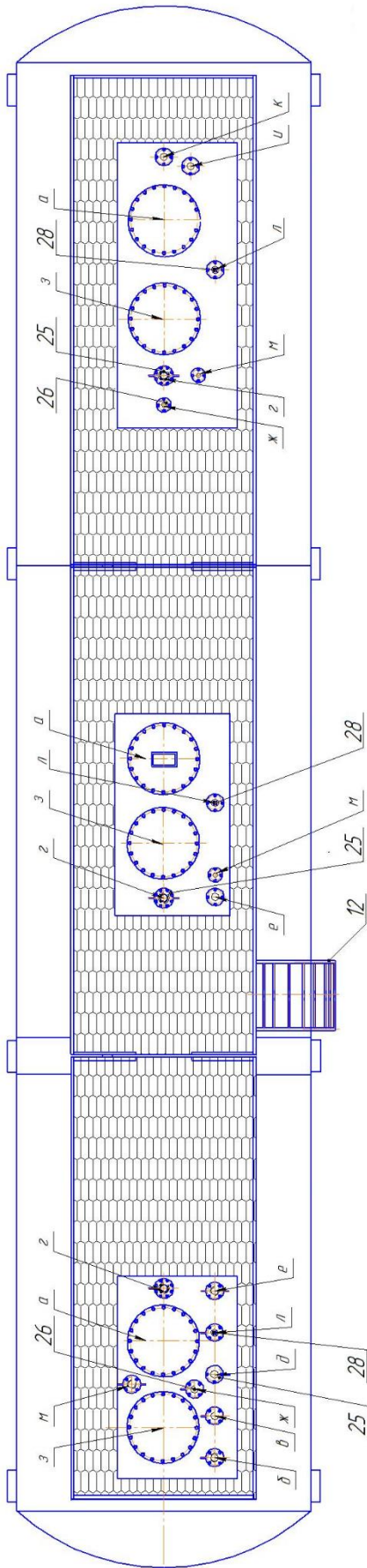


Рисунок 1.4 – Реактор БГУ-100. Вид сверху

Система транспортирования (загрузки, перекачивания и выгрузки) субстрата.

Система транспортирования состоит из бункера, шнекового транспортера, насосов (рисунок 5), системы трубопроводов.

Навоз предварительно накапливается в подогреваемом бункере, который не позволяет ему остывать зимой ниже 0°C . Влажность навоза измеряется непосредственно в бункере влагомером. Из бункера навоз подается шнековым транспортером.

При первичной загрузке (1 раз в год), навоз разбавляется водой в емкости подготовки сырья из внешнего источника до влажности 90% (задается на контроллере), далее субстрат перекачивается в емкость сбраживания, этот процесс осуществляется до тех пор, пока емкости не будут загружены полностью, система автоматического управления прекратит работу системы загрузки БГУ по сигналу от датчиков уровня в емкости сбраживания и в емкости подготовки субстрата.

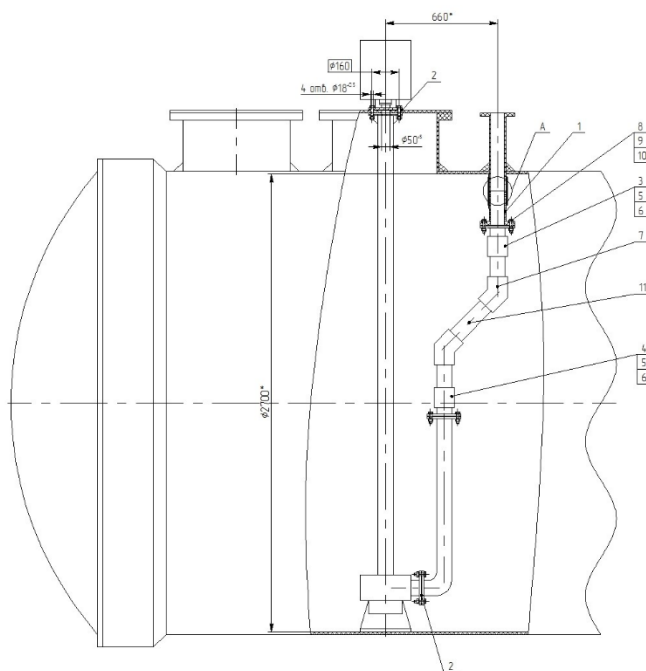


Рисунок 1.5 – Насос емкости подготовки субстрата

После того, как установка выходит на режим (начинается генерация горючего газа), загрузка сырья осуществляется в емкость подготовки сырья 1 раз в сутки в объеме от 1 до 10 тонн (зависит от выбора режима работы БГУ), где он разбавляется рекуперативной водой (вся жидкая фракция после сепаратора). При

этом влажность будет зависеть от объема рекуперативной воды после сепаратора. Одновременно с этим перекачивающим насосом из емкости подготовки сырья в емкость метаногенеза осуществляется подача подготовленного сырья в таком же объеме, и выгрузка эффлюента (жидкого биоудобрения) насосом выгрузки.

Система перемешивания БГУ-100

Перемешивание в БГУ-100 осуществляется рамными мешалками (рисунок 6), что обеспечивает:

- высвобождение образующегося биогаза;
- перемешивание свежего субстрата и популяции бактерий;
- предотвращение формирования корки и осадка;
- предотвращение появления участков разной температуры внутри реактора;
- равномерное распределение популяции бактерий;
- предотвращение формирования пустот и скоплений, уменьшающих рабочую площадь реактора.

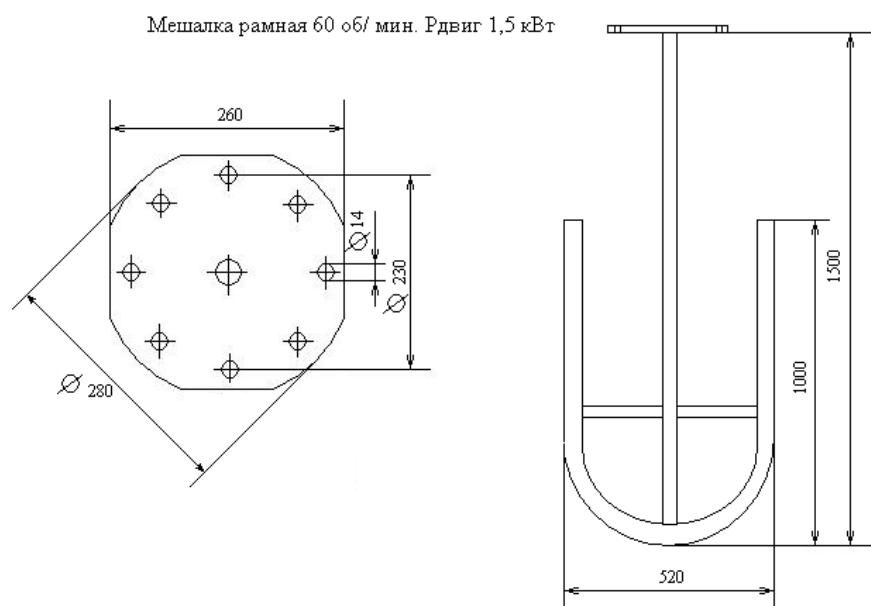


Рисунок 1.6 – Рамная мешалка

Шнековый сепаратор SEPIG/015/ (SEPCOM)

Предназначен для разделения эффлюента на твердую и жидкую фракции. Устанавливается на опорных рамах над второй секцией метаногенеза.

Сепаратор (рисунок 7) состоит из корпуса с цилиндрической решёткой и шнеком внутри, уплотняющей части, двух выходов для жидкой фракции, привода и

питающего бака.

Эффлюент поступает в установку и транспортируется шнековым конвейером в корпусе сепаратора. Жидкость сепарируется через щели цилиндрической решётки, установленной вокруг шнека. По мере прохождения эффлюента, выдавливается связанная вода, пока у выхода не образуется пробка из практически сухого материала. Сухая фракция постоянно выталкивается через выходную диафрагму. Обратное давление, создаваемое диафрагмой на выходе изменяется автоматически в зависимости от типа перерабатываемого сырья.



Рисунок 1.7 – Сепаратор эффлюента

Система газопереработки и газопотребления

Вырабатываемый установкой горючий газ (биогаз) по газопроводу из выходного отверстия емкости метаногенеза поступает на сепаратор газа (рисунок 8), где осушается и далее накапливается в газгольдере (рисунок 9). Биогаз из газгольдера поступает в помещение котельной и газогенераторной где используется для выработки тепловой и электрической энергии для собственных нужд, и нужд предприятия.



Рисунок 1.8 – Сепаратор биогаза



Рисунок 1.9 – Газгольдеры эластичные

Система подогрева БГУ-100

Система подогрева БГУ-100 – бифилярный теплообменник (система трубопроводов) вокруг биореактора, защищенная изоляцией и кожухом (рисунок 10). Такая система позволяет добиться наиболее равномерного распределения температур. Теплоноситель – обратная вода горячего водоснабжения. Подогрев на стадии пуска и до выхода на режим осуществляется электрическим котлом, далее – газовым котлом. Нагрев субстрата не превышает 2 - 3°C в сутки. Постепенный

нагрев необходим для эффективного развития метаногенного биоценоза.

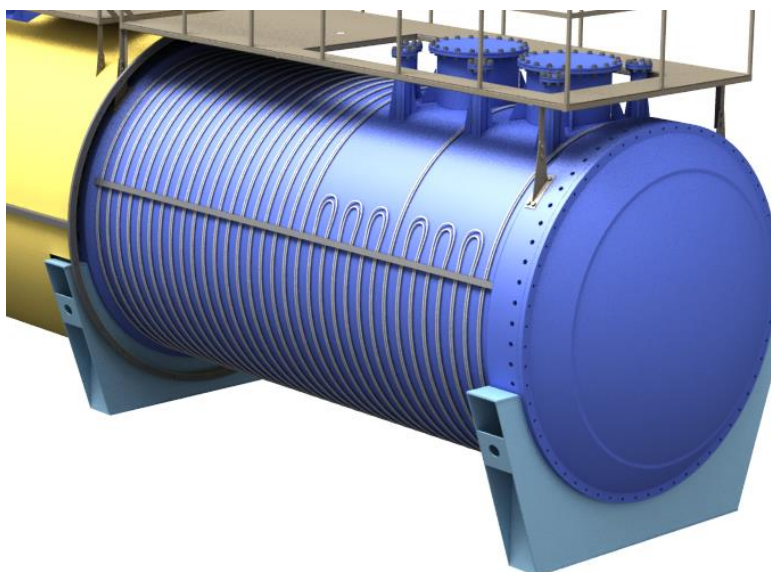


Рисунок 1.10 – Теплообменник реактора БГУ-100

Узел катализации процесса переработки (Пресс-экструдер)

Пресс-экструдер ПЭ-100, предназначен для экструдирования зерновых (пшеницы, ржи, ячменя, кукурузы), бобовых (гороха, нута). ПЭ в составе БГУ играет роль катализатора процесса метаногенеза, пищевая добавка, которую он производит позволяет метаногенным микроорганизмам размножаться активнее, что увеличивает скорость и качество процесса очистки.



Рисунок 1.11 – Пресс-экструдер

РАБОТА ОСНОВНЫХ УСТРОЙСТВ БГУ-100. РЕЖИМЫ РАБОТЫ БГУ-100

Загрузка подготовительной емкости

- Определение объема загрузки

Исходные данные:

- тип сырья задается в меню контроллера соответствующим профилем настроек техпроцесса;
- температура сырья; влажность сырья измеряются приборами и отображаются на дисплее контроллера, панели оператора и удаленном компьютере.

Выходные данные – масса сырья; объем воды.

Вычисление входных данных выполняется по заданным формулам в контроллере управления или масса сырья и объем воды задаются оператором (наладчиком) на основании исходных данных.

Требуемый объем добавочной и (или) регенеративной воды отсчитывается датчиками расхода.

- Последовательность загрузки подготовительной емкости:
 - включение шнекового транспортера.

Предусматривается включение пресс-экструдера, для подачи измельченного зерна вместе с навозом.

- включение насоса регенеративной воды и при нехватке регенеративной воды включение насоса добавочной воды для заливки требуемого объема воды в подготовительную емкость.

Отключение насоса регенеративной воды или блокирование его пуска выполняется при срабатывании датчика нижнего уровня в промежуточной емкости регенеративной воды.

- включение мешалки подготовительной емкости, на время, задаваемое в меню контроллера определяемое при наладке (по умолчанию 1 час).

- Выдержка загруженной массы сырья в подготовительной емкости

Время нахождения субстрата в подготовительной емкости при первичной загрузке до тех пор, пока не начнет вырабатываться горючий газ. Далее загрузка 1 раз в сутки от 1 до 10 тонн (задается на контроллере), по умолчанию 3 тонны.

Перекачка из подготовительной емкости в основную

- включение насоса перекачки субстрата в емкость метаногенеза;
- перекачка субстрата в емкость метаногенеза;
- выключение насоса перекачки при достижении значения уставки уровня в подготовительной емкости;
- включение мешалок емкости метаногенеза, на время, задаваемое в меню контроллера определяемое (по умолчанию 1 час).

Циклическое повторение алгоритма загрузки сырья на переработку повторение пунктов 1-3.

Удаление эффлюента (жидкого биоудобрения) из емкости метаногенеза

С периодичностью, определенной временем нахождения субстрата в подготовительной емкости (после выхода на режим – 1 сутки) и одновременно с перекачкой субстрата из подготовительной емкости в емкость метаногенеза, происходит удаление порции эффлюента из емкости метаногенеза.

- включение насоса удаления субстрата и шнекового сепаратора.

Предусматривается возможность задания задержки старта шнекового сепаратора относительно старта насоса удаления субстрата – время настраивается в меню контроллера.

- отключение насоса удаления субстрата и шнекового сепаратора производится по датчику уровня в емкости метаногенеза – значение уставки уровня задается в меню контроллера.

Перемешивание продуктов в емкости подготовки и емкости метаногенеза

Мешалка в емкости подготовки сырья включается после загрузки навоза и закачки добавочной или регенеративной воды. Время работы мешалки настраивается в контроллере (по умолчанию 1 час). Далее производится периодическое включение мешалки – время цикла настраивается в меню контроллера (по умолчанию 2 раза в сутки по 15 минут).

Мешалки в емкости метаногенеза включаются после перекачки продукта из подготовительной емкости в емкость метаногенеза. Время работы мешалок настраивается в контроллере (по умолчанию 1 час). Далее производится периодическое включение мешалок – время цикла настраивается в меню контроллера (по умолчанию 2 раза в сутки по 15 минут).

Сепарация эффлюента

Из емкости метаногенеза эффлюент подается на сепаратор, включение сепаратора производится одновременно с включением насоса удаления эффлюента, отключение – с задержкой 15 минут.

Вода после сепаратора по умолчанию в полном объеме насосом перекачивается в емкость подготовки субстрата.

Система газопереработки и газопотребления

Газ из выходного отверстия емкости метаногенеза проходит через анализатор метана, в случае если содержание метана больше или равно 50%, газ накапливается в газгольдерах, в ином случае – сбрасывается в окружающую среду.

В системе автоматики предусматривается контроль:

- содержания в биогазе CH_4 ,
- давления биогаза в емкости метаногенеза,
- давления биогаза на выходе из сепаратора,
- давления биогаза в газгольдере,
- температуры биогаза на выходе из сепаратора.

Для контроля загазованности помещения котельной и газогенераторной метаном,

и угарным газом документацией предусмотрена установка сигнализаторов загазованности типа RGDCO0MP1 Seitron с выводом сигнала на отключение электромагнитных клапанов на вводе газа при превышении предельных концентраций метана и угарного газа.

Система генерации тепла и электроэнергии

- Генерация тепла осуществляется газовым котлом водогрейным избыточного давления, из углеродистой стали, типа GTE -62/Bio , его технические данные:

Номинальная тепловая мощность	21 кВт
Номинальное давление жидкости	4 бар
Объем жидкости котла	48 литр
Аэродинамическое сопротивление в топке	0.7 дПа
Диаметр дымоотвода	130 мм
Диаметр отверстия под горелку	110 мм
Сухая масса	120 кг
Размеры котла ШхДхВ мм	570x675x640

С горелкой АВG-3-F/Bio-2-1-2 (специальное исполнение) для биогаза с содержанием H₂S не более 1,5%.

Моноблочная горелка номинальной мощностью	17-45 кВт
Вид топлива	биогаз
Длина огневой трубы	100 мм D=80мм
Присоединительное давление газа	20-40 мбар
Система регулирования	одноступенчатое регулирование
Размер газовой рампы	1/2"
Газовая арматура	UNIGARATE для H ₂ S
Эл. питание	230 Вольт, 50Гц. IP 20.
Потребляемая суммарная мощность	140 Вт
Вес горелки	26 кг

- Генерация электроэнергии осуществляется газопоршневой электростанцией (ГПЭС) G22-3-RE-LF (рисунок 12).



Рисунок 1.12 – газопоршневая электростанция

Технические параметры ГПЭС

МАКСИМАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ, КВА / КВТ		22.0 / 17,6	
ОБЩИЕ	Номинальная долговременная мощность, кВа / кВт	20.0 / 16.0	
	Частота тока / скорость вращения, Гц / об/мин	50 / 1500	
	Тип регулятора скорости вращения / точность регулирования, %	Изохронный/±0,25	
	Количество фаз, напряжение, В	3 фазы / 400	
	Расход топлива на номинальной мощности (натуральный природный газ/биогаз), м3/ч	6,1 +10%/10,2+10%	
	Давление подачи газа, кПа	1,7-2,5	
	Степень автоматизации	1	
	Размеры (длина, ширина, высота), мм.	1450 x 700 x 1200	
	Вес, кг	600	
	Модель двигателя	REG 490	
ДВИГАТЕЛЬ	Количество и расположение цилиндров	4, рядное	
	Диаметр цилиндра / Ход поршня, мм	90 x 100	
	Степень сжатия	16 : 1	
	Объем цилиндров двигателя, л	2,54	
	Турбонаддув	нет	
	Тип используемого масла	10w40	
	Расход масла, г / кВт в час	около 1,63	
	Система охлаждения	жидкостная	
	ГЕНЕРАТОР	Номинальная мощность, кВА	22
		Напряжение, В	230/400
Точность регулирования напряжения, %		±1	
Частота, Гц		50	
Коэффициент мощности, cos φ		0,8	
Количество фаз, тип соединений		3, звезда	
Тип возбуждения		Самовозбуждение, бесщеточное	
Ток короткого замыкания	300%		

Система отопления

Система отопления предусматривается закрытой, двухтрубной.

Источниками теплоснабжения являются два водогрейных котла: газовый и электрический.

Приоритетным в работе является газовый котел, электрический котел используется в периоды пуска и отсутствия газа для сжигания. Циркуляцию теплоносителя в системе отопления обеспечивает циркуляционный насос.

Система отопления «со стороны» баков БГУ-100 состоит из трех отопительных контуров секция I, секция II, секция III.

Запуск системы отопления производится при пуске установки в работу.

Циркуляционный насос работает постоянно, пока запущена система отопления. Защита насоса производится по давлению на входе, значение давления задается в меню контроллера.

Запуск в работу газового котла производится при наличии давления газа в газгольдере выше установленного - значение задается в меню контроллера. Перед запуском газового котла в работу электрический котел из работы выводится, при запуске электрического котла из работы выводится газовый.

На выходе каждого котла предусматривается установка манометра с дискретными выходами по повышению давления выше максимального, при повышении давления производится остановка котла.

Для обеспечения протока теплоносителя через котлы предусматривается следующая система запуска. Перед пуском котла открывается клапан протока теплоносителя через котел (время запуска котла после открытия клапана задается в меню контроллера), при остановке сначала останавливается котел, а потом производится закрытие клапана (время закрытия клапана после остановки задается в меню контроллера).

Регулирование мощности котлов производится встроенными регуляторами.

Регулирование количества теплоносителя, поступающего в каждый контур отопления, производится за счет использования трехходового клапана по температуре в отапливаемой емкости. Температура, поддерживаемая в емкостях секций, задается в меню контроллера.

2 Анаэробная биологическая очистка

Анаэробную очистку используют для удаления загрязнений из сточных вод, в качестве первой ступени очистки сточных вод с высокой концентрацией органических загрязнений ($BPK_{п} > 4-5$ г/л), а также для переработки активного ила, других осадков и твердых отходов. Многие твердые отходы содержат целлюлозу, легче поддающуюся анаэробному разложению с образованием биогаза, чем аэробному окислению.

В ходе метаногенерации (метаногенеза) – анаэробного процесса с образованием метана – органические загрязнения конвертируются в биогаз, содержащий в основном CH_4 и CO_2 . Его можно использовать в качестве топлива. Количество выделяемого биогаза достаточно не только для компенсации энергетических затрат на анаэробное разложение, но и для использования сторонними потребителями – в котельных или нагревателях для получения пара и горячей воды, в стационарных газогенераторах для получения электроэнергии с рекуперацией тепла, в технологических процессах термосушки и сжигания осадков и др. Биогаз может быть трансформирован в электрическую энергию с к.п.д. 33%, в тепловую – с к.п.д. 90%. После удаления CO_2 и H_2S его можно использовать в двигателях внутреннего сгорания или в дизельных двигателях. В средней полосе России биогаз, выделяемый метантенком при переработке навоза одной коровы, способен обогреть дом семьи из 4 человек и стойло коровы.

Промышленное применение систем анаэробного разложения неуклонно расширяется в связи с возрастанием требований к энергоэкономичности процессов, особенно при очистке сильно загрязненных стоков, с возможностью получения альтернативного топлива – биогаза, непригодностью других способов очистки некоторых сточных вод и появлением высокоэффективных анаэробных реакторов нового поколения.

2.1 Биоценозы и биохимические процессы при анаэробной очистке

Анаэробные биоценозы при очистке сточных вод могут представлять

собой флоккулы, биопленки и гранулы ила. Они развиваются в экосистемах с доминированием аноксигенных и анаэробных условий, в которых протекают процессы брожения, аноксигенного окисления (анаэробного дыхания) и метанообразования. Такие условия наблюдаются в анаэробных биореакторах при очистке сточных вод и сбраживании органических отходов, в центральных зонах крупных флоккул в нижних слоях биопленок, в застойных зонах и вторичных отстойниках при аэробной очистке сточных вод, в илах природных водоемов и биопрудов, и т. п.

Аноксигенное окисление органических субстратов включает процессы денитрификации и сульфатредукции, протекающие при наличии ионов NO^{3-} , NO^{2-} , SO_4^{2-} и, как правило, при отсутствии кислорода. Эти процессы используются для удаления соединений азота и серы из сточных вод.

Основной процесс, который происходит в анаэробных условиях и используется для разложения и удаления органических загрязнений и отходов – метаногенез.

Аноксигенному окислению и анаэробному сбраживанию подвергаются органические субстраты и ксенобиотики: природные полимеры (целлюлоза и белки), углеводы и жиры, органические спирты, кислоты и основания, углеводороды, хлорированные соединения и др.

При использовании свободного кислорода для окисления органических субстратов выделяется больше энергии, чем при использовании в качестве акцептора электронов нитратов и сульфатов. Наименьшее количество энергии выделяется при метанообразовании, где окислителем является CO_2 . В соответствии с выделяемой энергией при окислении органических соединений акцепторы электронов используются в такой последовательности: O_2 , NO^{3-} , SO_4^{2-} , CO_2 .

Таблица 2.1 – Сравнение энергетического выхода при окислении ацетата и глюкозы в аэробных, анаэробных и анаэробных условиях

Донор электронов	Акцептор электронов	Реакция	Энергия переноса электронов, кДж/моль органического субстрата
Ацетат	O ₂	$\text{CH}_3\text{COO}^- + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O}$	-847
	NO ₃ ⁻	$\text{CH}_3\text{COO}^- + 4\text{NO}_3^- = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 4\text{NO}_2^-$	-537
	SO ₄ ²⁻	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{SO}_4^{2-} + 3/2\text{H}^+ = \text{CO}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + 1/2\text{H}_2\text{S} + 1/2\text{HS}^-$	-51
	CO ₂	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} = \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$	-28,5
Глюкоза	O ₂	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$	-2886
	NO ₃ ⁻	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 12\text{NO}_3^- = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 12\text{NO}_2^-$	-652
	SO ₄ ²⁻	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 3\text{SO}_4^{2-} + 9/2\text{H}^+ = 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O} + 3/2\text{H}_2\text{S} + 3/2\text{HS}^-$	-166
	CO ₂	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = 3\text{CO}_2 + 3\text{CH}_4$	-143

Не всегда более энергетически выгодные реакции подавляют протекание менее энергетически выгодных. Так, микроорганизмы могут и в аэробных условиях осуществлять денитрификацию и сульфатредукцию.

В биореакторах, предназначенных для удаления азота из сточных вод аэробно-анаэробным методом, у поверхности флоккул и пленок протекает нитрификация, глубже в анаэробной зоне – денитрификация. Во внешней зоне доминируют популяции нитрифицирующих бактерий родов *Nitrosomonas* и *Nitrobacter*, внутри – денитрификаторы.

В процессе метаногенерации (часто называемом «метановым брожением»), что с биохимической точки зрения не совсем корректно) происходит разложение органических субстратов и загрязнений, обеззараживание и детоксикация стоков. В природе этот процесс протекает в различных средах с анаэробными условиями, в рубце жвачных животных, в термитниках.

Метаногенерация – сложный, многостадийный процесс, в котором исходные органические вещества последовательно превращаются в более простые с переходом значительной части углерода в метан и углекислый газ и в иловую жидкость. Биохимические и микробиологические особенности

анаэробного разложения органических веществ в стоках и отходах изучены достаточно хорошо, что позволяет осуществлять эффективные биотехнологические процессы.

Метановое разложение включает три стадии анаэробного брожения (рисунок 2.1): гидролиз, кислотную (ацидогенную), ацетогенную и четвертую, метаногенную, стадию (стадию газообразования); оно способно протекать при пониженных (10–20 °С, психрофильный режим), умеренных (30–37 °С, мезофильный режим) и повышенных (50–55 °С, термофильный режим) температурах. Естественно, что чем выше температура, тем выше скорости биохимических процессов, поэтому, как правило, термофильный режим сбраживания является наиболее производительным. Но несмотря на более высокие скорости сбраживания при термофильном режиме, получаемый эффект, как правило, недостаточно велик, чтобы возместить тепловые затраты, необходимые для его поддержания. К тому же в этих условиях видовой состав микрофлоры достаточно беден, чем и объясняется меньшая стабильность термофильного режима по сравнению с другими. В связи с этим, большинство анаэробных реакторов в настоящее время работают в мезофильном режиме, как правило, 30—40°С, обеспечивающем приемлемые скорости сбраживания, относительную энергетическую выгодность поддержания температурного режима, и стабильность процесса за счет существования достаточно количества видов микроорганизмов. Протекание стадий метанового разложения нестрого последовательно во времени – часть субстрата может претерпевать гидролитическое расщепление при одновременном метанообразовании из продуктов разложения (рисунок 2.3).

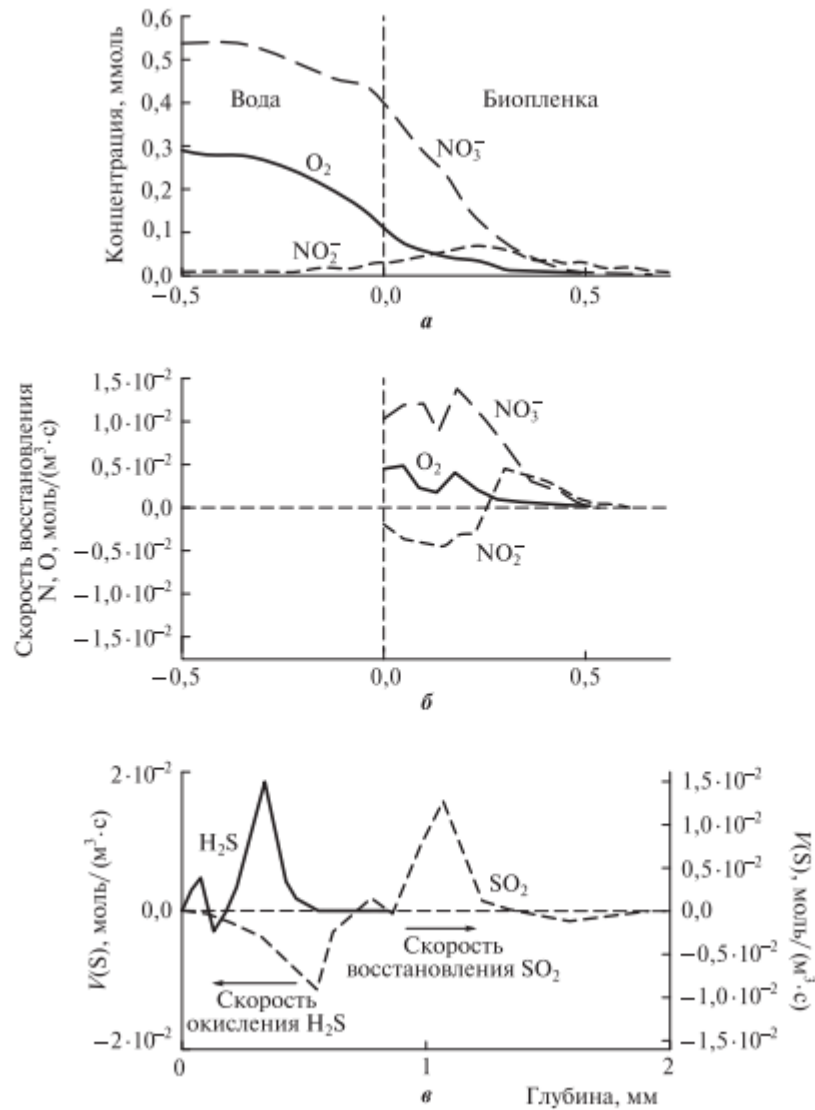


Рисунок 2.1 – Профили концентраций и скорости конверсии акцепторов электронов в биопленке (по D. DE Beer, P. Stoodley, с изменениями): а – концентрация O_2 , NO_2^- , NO_3^- ; б – скорость восстановления O_2 , NO_2^- , NO_3^- ; в – скорость окисления H_2S и восстановления SO_2

В первой стадии брожения принимают участие микроорганизмы-гидролитики, обладающие целлюлолитической, протеолитической, амилолитической, липолитической, аммонифицирующей активностью. Содержащиеся в среде нитраты и сульфаты восстанавливаются бактериями-денитрификаторами и сульфатредукторами. В результате ферментативного гидролиза целлюлоза в гемицеллюлозы, белки, жиры и другие компоненты гидролизуются с образованием жирных кислот, глицерина, пептидов, аминокислот, моно- и дисахаров и в небольшом количестве уксусной кислоты, метанола, аммиака, водорода. В гидролизе участвуют бактерии pp. Clostridium,

Bacillus, а также Bacteroides, Butyrivibrio, Cellobacterium, Eubacterium, Bifidobacterium, Lactobacillus, Selenomonas. Состав доминирующей микрофлоры гидролитической стадии зависит от состава поступающих микрофлоры и субстрата. В первой фазе брожения содержание аэробных и факультативно анаэробных микроорганизмов достигает 10^6 кл./мл, содержание облигатных анаэробов в 100 – 1000 раз выше.

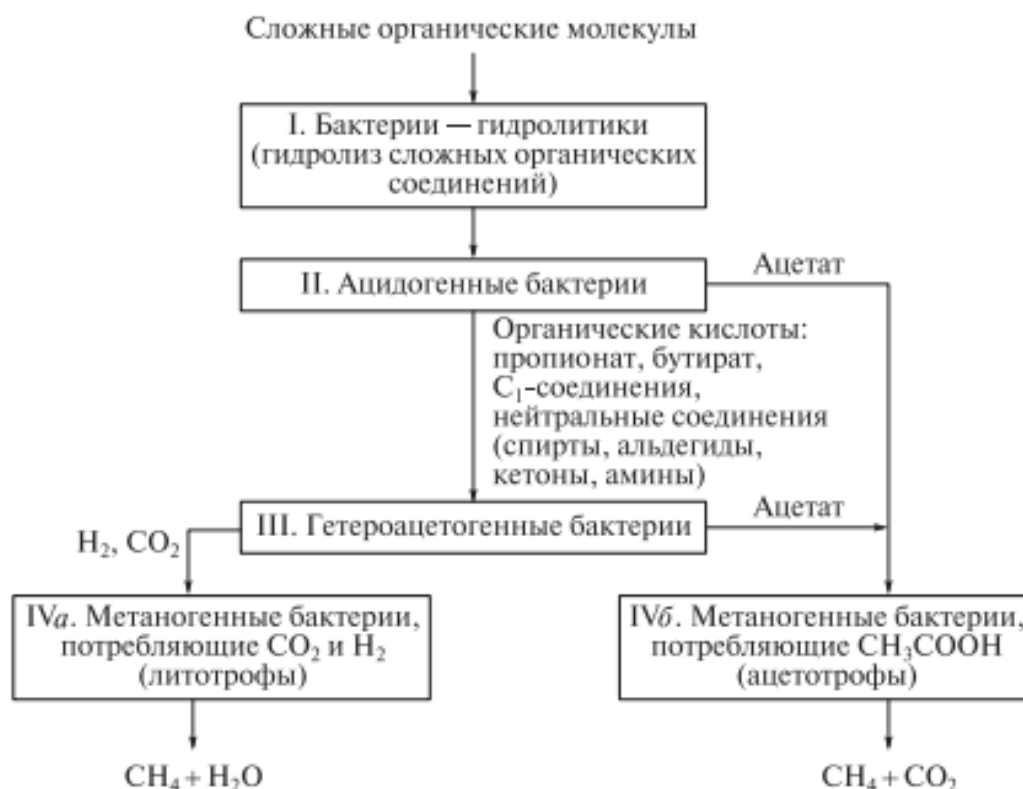


Рисунок 2.2 – Стадии анаэробного разложения с образованием метана

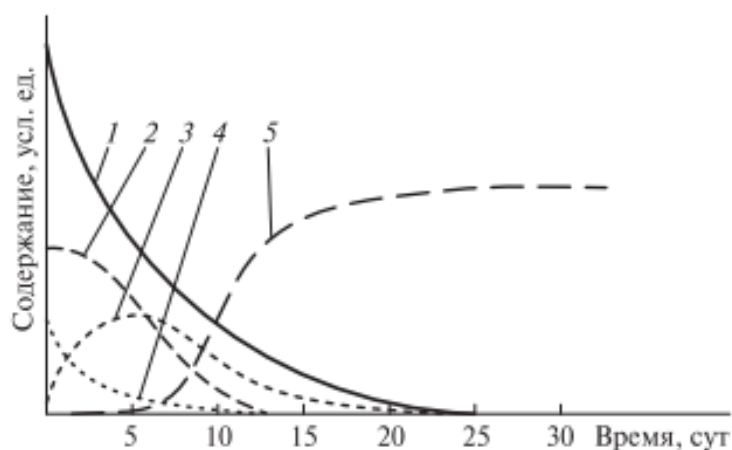
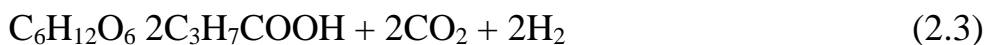
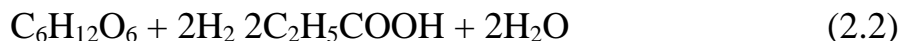


Рисунок 2.3 – Ход процесса разложения органических веществ в метантенке:
1 – органические вещества; 2 – липиды; 3 – летучие кислоты; 4 – белок; 5 – метан

На ацидогенной стадии протекают различные виды брожения: спиртовое,

маслянокислое, ацетоно-бутиловое, пропионовое и другие, в ходе которых бактерии-ацидогены сбрасывают образующиеся продукты гидролиза, например глюкозу, до органических кислот:

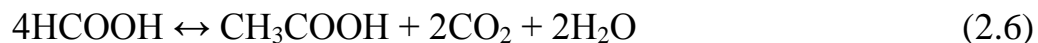
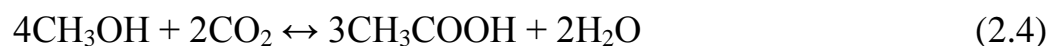


Потребляя моно- и олигосахариды, аминокислоты и другие промежуточные продукты гидролиза, эти бактерии тем самым предотвращают ингибирование продуктами гидролиза гидролитических ферментов, участвующих в первой фазе брожения.

Ацидогенные бактерии, как правило, наиболее активны при рН среды от 4,5 до 7,0. Пропионовая и масляная кислоты слабее уксусной; при их образовании среда закисляется меньше, чем при образовании уксусной кислоты, что позволяет популяции поддерживать оптимальный рН. Время генерации клеток на этой стадии составляет несколько часов. Стадию кислотообразования способны осуществлять бактерии рр. *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Sarcina*, *Micrococcus* и других, многие из которых принимают участие и на первой, гидролитической, стадии брожения.

В результате расщепления на первых двух стадиях 70 – 80% образующихся органических продуктов составляют высшие жирные кислоты, до 20% – ацетат и 3 – 5% – водород. Среди других продуктов – изомасляная, фенилуксусная, бензойная, индолилбензойная кислоты, NH^{4+} , H_2S , бутанол, пропанол, CO_2 и др.

На ацетогенной стадии брожения гетероацетогенные бактерии (ацетогены) рр. *Clostridium*, *Syntrophus* и других переводят органические кислоты, например пропионовую и масляную, и прочие продукты ацидогенеза в уксусную кислоту:

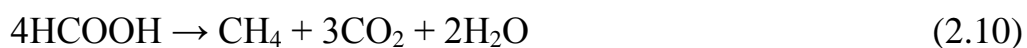


Эти реакции обратимые, протекают с затратой или небольшим выходом энергии, поэтому они возможны только при низком парциальном давлении H_2 в смешанных культурах микроорганизмов, потребляющих водород. Они лимитируют весь процесс метанообразования. Потребление водорода метаногенными бактериями (в специальной литературе называемое межвидовым переносом водорода) на последующей стадии смещает равновесие реакций в сторону образования ацетата, и бактерии-ацетогены получают из исходного субстрата больше энергии. Поэтому ацетогенные и метаногенные бактерии часто пространственно взаимосвязаны; в агрегатах, например в гранулах анаэробного ила и в биопленках, они встречаются в непосредственной близости друг от друга. Такие субстраты, как пропионат, этанол и лактат, сначала превращаются ацетогенной микрофлорой в ацетат и H_2 . При нарушении метаногенерации в среде сбраживания накапливаются водород, а также пропионовая, масляная и высшие жирные кислоты. Жирные кислоты в нейтральной форме в концентрации >2 г/л токсичны для анаэробного сообщества. По достижении концентрации водорода 0,2–0,5% может полностью прекратиться биodeградация субстрата и нарушиться метанообразование.

Конечными продуктами ацетогенной стадии являются ацетат (50–55%), H_2 (23–25%) и CO_2 .

Основную роль в заключительной, метаногенной, стадии выполняют строгие анаэробы – метанообразующие бактерии. Они более чувствительны к условиям среды. Время генерации клеток метаногенов составляет несколько суток. Их активность максимальна при рН среды от 6,8 до 7,5. При более низких и высоких значениях рН развитие метаногенов замедляется либо прекращается совсем.

Продукт реакций метаногенной стадии – CH_4 . Образование его возможно двумя путями. Метаногенные бактерии-литотрофы (pp. *Methanosoccus*, *Methanobacterium*, *Methanospirillum*, *Methanomicrobium*, *Methanogenium*, *Methanothermus*, *Methanobrevibacter*) потребляют в качестве субстрата H_2 и CO_2 , а также СО и формиат:



Микроорганизмы-ацетотрофы (pp. *Methanosarcina*, *Methanosaeta*, *Methanoplanus*) используют ацетат, метанол, метиламин:



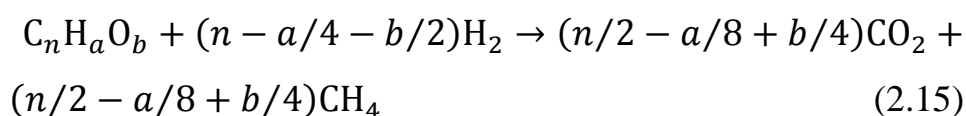
Вследствие разрушения органических кислот рН среды повышается, реакция среды становится щелочной, поэтому метаногенную стадию иногда называют «щелочным брожением».

При разложении уксусной кислоты образуется 70–75% метана, а остальные

25 – 30% – в результате синтеза из углекислоты и водорода и протекания других реакций. Соотношение конечных продуктов в процессе метанового брожения зависит от состава среды, условий ферментации и присутствующей микрофлоры.

Таким образом, в процессе метанообразования участвуют сложные метаногенные ассоциации, в которых одни члены сообщества функционируют в тесной связи с другими. Ряд таких ассоциаций получил самостоятельное название (например, *Methanobacillus kuznesceovii*, образующая метан при разложении биомассы водорослей).

Суммарно процесс метанообразования при полном разложении органического субстрата с формулой $C_nH_aO_b$ (т. е. без учета новообразования биомассы) можно представить следующим образом:

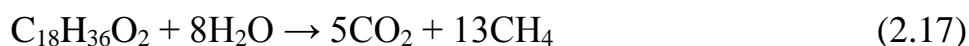


При разложении глюкозы:



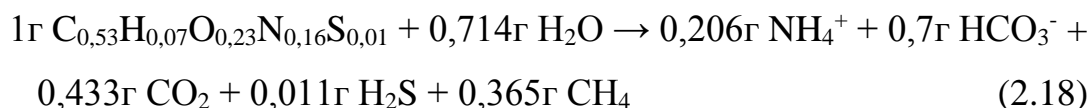
на 1 г глюкозы выделится 0,733г CO_2 и 0,267г CH_4 .

При разложении жиров состава $C_{18}H_{36}O_2$:



на 1 г жиров выделится 0,775г CO_2 и 0,732г CH_4 .

При полном разложении белка с условной формулой (в долях от массы белка) $C_{0,53}H_{0,07}O_{0,23}N_{0,16}S_{0,01}$:



на 1г белка выделится 0,433г CO_2 и 0,365г CH_4 . Таким образом, наибольшее количество биогаза и наибольшее содержание метана в биогазе наблюдается при разложении жиров. Биомасса микроорганизмов при метаногенном разложении состоит из 45 – 50% углерода, 30 – 40% кислорода, 7 – 8% водорода, 10 – 12% азота, 1,5 – 2% фосфора и 0,8 – 1,2% серы. Кроме того, в биомассе содержатся калий, натрий, кальций, магний и ряд микроэлементов, наиболее важные из которых кобальт, молибден и никель. В среднем, чтобы обеспечить формирование клеточной массы с эмпирической формулой $\text{C}_5\text{H}_9\text{O}_3\text{N}$, оптимальное соотношение ХПК: N: P в среде должно быть близко к 700: 5: 1 (при разложении загрязнений в аэробных условиях оптимальное соотношение ХПК: N: P составляет 100: 2 – 6: 0,6 – 1,2).

Без учета CO_2 , растворяющегося в иловой жидкости (в виде карбоната или гидрокарбоната), и образования биомассы при распаде 1г жиров приведенного состава в среднем будет образовано 1420 мл газа, в котором объемная доля $\text{CH}_4 = 72\%$, $\text{CO}_2 = 28\%$ (1,51г газа на 1г беззольного вещества). При распаде 1г углеводов образуется 750 мл газа, содержащего по объему 50% CH_4 и 50% CO_2 (1г биогаза на 1г беззольного вещества). При распаде белков приведенного состава образуется 730 мл биогаза, содержащего по объему 70% CH_4 и 30% CO_2 (0,8г газа на 1г беззольного вещества). Жироподобные вещества разлагаются на 70 – 90%, сложные углевод подобные – на 60 – 85%. Остальное частично переходит в новообразованную биомассу, частично остается не до конца разложившимся.

Осадок первичных отстойников содержит 15 – 20% углеводов, 20 – 30% жироподобных веществ, 20 – 30% белков. Избыточный активный ил с вторичных отстойников – 50% белков. Поэтому выход и доля метана в биогазе на единицу беззольной части осадка из первичных отстойников обычно выше, чем при разложении активного ила.

В зависимости от состава сбраживаемого субстрата объемная доля CH_4 в биогазе колеблется от 50 до 75%, его теплотворная способность от 20,9 до 33,4 МДж/м³. С 1кг ХПК усредненных органических загрязнений образуется

0,4 – 0,7 м³ биогаза с типичным составом (объемная доля, %): CH₄ – 60 – 65, CO₂ – 30 – 32, H₂ – до 2, CO – 1–2, N₂ – 0,3–0,5, O₂ < 0,2 (появляется из-за не герметичности биореактора при загрузке и выгрузке сырья). 1 м³ биогаза такого состава имеет теплотворную способность 21–23 МДж/м³, что эквивалентно 6 кВт·ч электроэнергии, 0,6 л керосина, 1,5 кг угля, 3,5 кг дров, 0,4 кг бутана.

По сравнению с окислением глюкозы до CO₂ и H₂O при разложении глюкозы до метана в нем сохраняется до 83% энергии. При синтезе CH₄ выход энергии не превышает 2 моль АТФ на 1 моль CH₄, поэтому для роста метанообразующих бактерий должно образоваться значительное количество CH₄, при этом 5 – 10% от исходного углерода переходит в клеточный материал, а остальные 90 – 95% – в метан. Вследствие низкого энергетического выхода (в виде АТФ) при анаэробном брожении активного ила образуется в несколько раз меньше (0,05 – 0,1 кг/кг ХПК), чем при аэробном, что облегчает решение проблемы захоронения его избытка.

Большим стимулом к развитию многих из современных методов анаэробной очистки послужило обнаружение в середине 1970-х гг. способности микроорганизмов, входящих в состав метаногенного сообщества, образовывать агрегаты – гранулы (пеллеты) при росте в анаэробном реакторе в условиях восходящего потока (рисунок 2.4).

Первоначально гранулы формируются в результате совместного агрегирования суспендированных частиц и растущих бактерий. Под действием восходящего потока воды более легкие частицы и неагрегированные бактерии вымываются, а агрегаты остаются, и таким образом происходит их автоселекция. Направление и скорость процесса грануляции, а также характеристики сформированного гранулированного ила зависят от видового состава и соотношения микроорганизмов в гранулах, таких их свойств, как скорость роста и отмирания, морфология, субстратная специфичность, гидрофобность, заряд поверхности, способность синтезировать специфические полимеры. Среди этих свойств особенно важны скорости роста и отмирания. Медленно растущие метаногенные и ацетогенные микроорганизмы формируют компактные плотные гранулы с хорошей осаждаемостью.

Благодаря этой способности гранул в реакторе можно достичь высокой концентрации биомассы, скорости сбраживания загрязнений и метаногенерации.

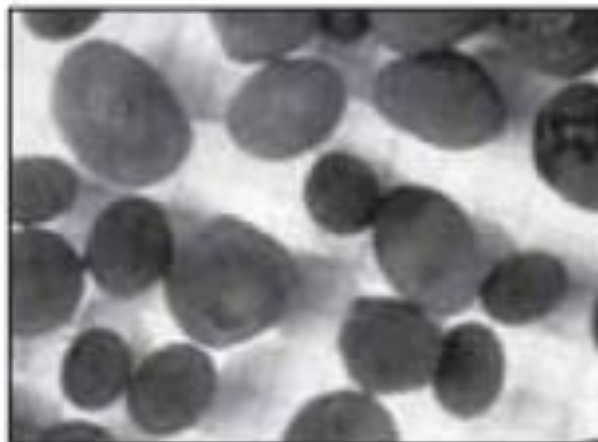


Рисунок 2.4 – Гранулы анаэробного ила

Плотные, стабильные гранулы формируются на субстратах, содержащих растворимые белки и ионы Ca^{2+} . Карбонат кальция может образовывать пористый скелет, что обеспечивает подходящие для метаногенеза условия. Стабильность и седиментационные свойства гранул становятся хуже при очистке стоков с высоким содержанием углеводов, в присутствии таких неполярных соединений, как нафталин, поверхностно-активных веществ, при невысоких нагрузках на ил, резких колебаниях в составе субстратов, лимитировании метаногенеза фосфором, присутствии в питающем растворе дисперсных ацидогенных микроорганизмов.

На поверхности гранул наблюдаются поры различной величины, служащие для транспорта субстрата и выхода биогаза. Концентрация микроорганизмов в гранулах варьирует в пределах $(1 - 4) \cdot 10^{12}$ клеток на 1г сухого вещества гранул, в том числе метаногенов – до 10^{10} кл./г. В гранулах присутствуют внеклеточные полимеры в виде оболочки, покрывающей поверхность гранул, а также волокон. Эти полимеры могут быть белками, липополисахаридами, веществами клеточных стенок и капсул лизированных клеток. Минеральный состав гранул варьирует в очень широких пределах. Особую роль в формировании и функционировании гранул выполняют

метаногенные бактерии *Methanosaeta concilii* (*Methanotherix soehngeni*), а также *Methanosarcina* spp. Бактерии р. *Methanosaeta* образуют хворосто- и клубкообразные структуры (рисунок 2.5), внутри которых группируются микроколонии бактерий *Methanosarcina* (рисунок 2.6). Благодаря этому формируются агрегаты в виде плотных легкооседающих гранул размером 1–5 мм. В таких гранулах снаружи развиваются сульфатредукторы, а внутри – метаногены. В промежуточном слое развиваются ацидогенные и гетероацетогенные бактерии, которые сбрасывают субстраты до низкомолекулярных органических кислот и обеспечивают сульфатредукторов и метаногенов водородом и ацетатом (рисунок 2.7).

Гранулы такого ила стабильны, в них создаются оптимальные условия для всех его биообъектов с единой метаболической цепью, в которой продукты жизнедеятельности микроорганизмов внешних слоев служат энергетическим субстратом для микроорганизмов центральных зон. Ацетотрофные метаногены, находящиеся в центральной зоне и расщепляющие ацетат на CH_4 и CO_2 , функционируют как метановый мотор, который при продавливании метана через поры гранул навстречу потоку метаболитов из внешних слоев осуществляет метаболизм популяции анаэробного микробиотопа.

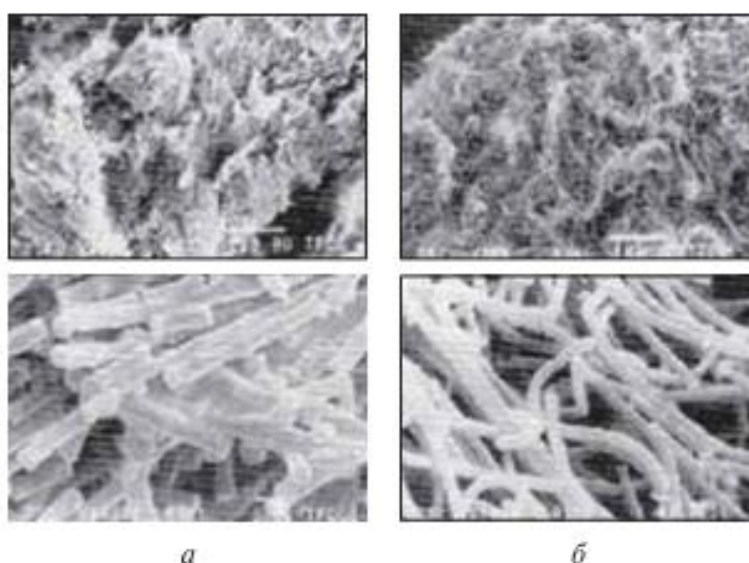


Рисунок 2.5 – Сканирующая электронная микрофотография клеток *Methanosaeta*, растущих в виде длинных нитей (а) и коротких цепочек (б)

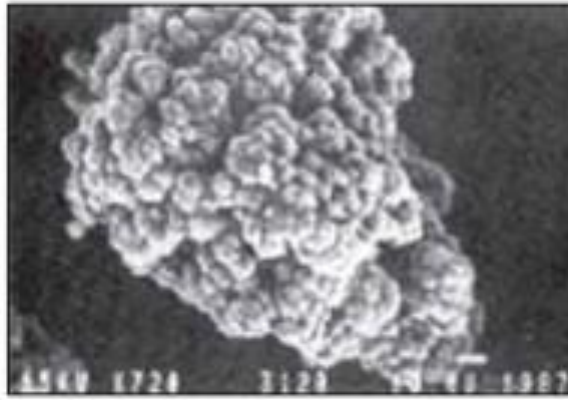


Рисунок 2.6 – Микроагрегаты бактерий р. *Methanosarcina*, присутствующих в гранулированном метаногенном иле

По видовому составу анаэробные ил и биопленки менее разнообразны, чем аэробные. В активном иле анаэробных реакторов встречается около 50 видов бактерий, осуществляющих различные стадии брожения и метанообразования, а также сульфатредукторы. Наряду с облигатными анаэробами в этих сооружениях могут встречаться и факультативные анаэробы. Количество анаэробных бактерий достигает $1,5 \cdot 10^{10}$ кл./мл ила. Могут присутствовать грибы, дрожжи и простейшие, попадающие в реактор вместе со сбрасываемым материалом. В метаногенном активном иле содержится намного меньше патогенных микроорганизмов, чем в аэробном. Это обусловлено бактерицидным действием образующихся летучих жирных кислот (уксусной, пропионовой, изомасляной, каприловой, гептановой) на патогенную микрофлору. При термофильном режиме сбрасывания гибель патогенов происходит и вследствие действия повышенных температур.

Микрофлора активного ила, биопленок и гранул анаэробных реакторов формируется в результате жизнедеятельности микроорганизмов, попавших вместе со сточными водами, осадком или отходами, а также аборигенной микрофлоры (при анаэробных процессах очистки в почвенных экосистемах). На формирование анаэробного ила и биопленок требуется значительно больше времени, чем на формирование аэробных.

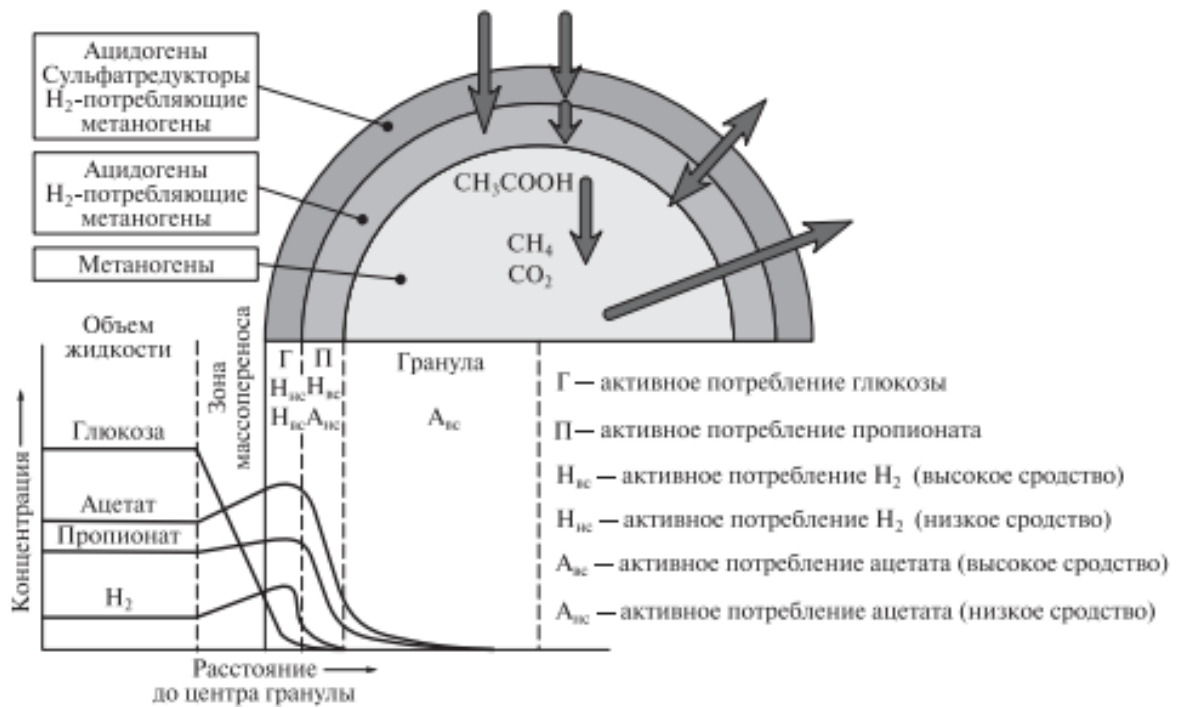


Рисунок 2.7 – Основные процессы и профиль концентраций субстратов и продуктов в грануле анаэробного метаногенного ила (по S. R. Guiot et al., 1991)

3 Опытная эксплуатация биогазовой установки БГУ-100

Целью опытной эксплуатации биогазовой установки БГУ-100:

1. Отработка температурных режимов работы БГУ-100 на фундаментальном субстрате (навоз КРС, ООО "Золотая НИВА").
2. Отработка одновременной загрузки и выгрузки субстрата БГУ-100 (обновление фундаментального субстрата на 50% = 35 м³).
3. Анализ эффлюента на состав и ценность, как биоудобрения и исследование его теплотворной способности для использования в качестве сырья для электротеплогенератора. (Привлечение специализированной лаборатории).
4. Выход на непрерывный режим номинальный режим работы БГУ-100 (загрузки-выгрузки со стабильной генерацией газа, непрерывной работой котла и периодическим включением газопоршневой электростанции) на фундаментальном субстрате.
5. Сбраживание сложноразлагающейся биомассы - в основном целлюлозы (костра льна, костра конопли, плевела зерен) с использованием ультразвуковой установки предварительной подготовки субстрата.
6. Анализ эффлюента на состав и ценность, как биоудобрения и исследование его теплотворной способности для использования в качестве сырья для электротеплогенератора. (Привлечение специализированной лаборатории).
7. Сбраживание высокотоксичных органических отходов (птичий помет, свиной навоз, фекальные стоки) в непрерывном номинальном режиме.
8. Сбраживание активного ила в непрерывном номинальном режиме в смеси с другими органическими отходами растительного и животного происхождения.
9. Анализ эффлюента на состав и ценность, как биоудобрения и

исследование его теплотворной способности для использования в качестве сырья для электротеплогенератора. (Привлечение специализированной лаборатории).

10. Плановое техническое обслуживание БГУ-100, замена неисправного, вышедшего из строя в результате эксплуатации оборудования и измерительных приборов, отладка системы автоматизации БГУ-100.

11. Ввод в эксплуатацию, вывод на установленную мощность БГУ-100.

12. Устойчивая работа БГУ-100 в режиме метангенерации на различных субстратах (по формированию запроса от заказчика БГУ).

3.1 Отработка режимов работы БГУ-100

Выбор режима работы БГУ зависит от условий, субстрата и задач, которые необходимо решить в результате обработки данного субстрата.

На сенсорном дисплее шкафа управления БГУ необходимо выбрать один из режимов в соответствии с описанием в таблице ниже.

Таблица 3.1 – Параметры режимов работы БГУ-100

Режим	W, %	d, %	α , %	T, C°	$V_{бр}$,	$V_{навоза}$,	$K_{эф}$
					тыс.м ³ /год	тыс.м ³ /год	
ОММ	91	5	9,62	М*	30,05	1011,78	0,46
			8,99		20,13		0,19
			8,52		26,61		0,39
ОНМ	91	5	15,02	Т*	46,95	1011,78	0,42
			14,05		31,46		0,14
			13,30		41,58		0,35
ОСМ	90	2	7,21	П*	11,13	674,52	0,46
			4,83		7,46		0,19
			8,91		9,86		0,39
СНФ	88	20	2,82	Т*	62,60	6745,20	- 0,98
			2,63		41,95		- 1,95
			2,49		55,44		- 1,23

CEW	91	0,5	96,16	M*	73,99	157,38	0,81
			89,90		49,57		0,72
			85,15		65,52		0,79
СЕН	93	1	96,59	T*	43,16	210,80	0,72
			90,30		28,92		0,59
			85,53		38,22		0,59

Описание режимов приведены ниже.

Таблица 3.2 – Описание режимов работы БГУ-100

Режим работы БГУ	Условия использования	Рекомендации по улучшению эффективности	Примечание
«Optimum warm medium» (OWM) – «Оптимальный»: по температуре – «тёплый», по скорости образования биогаза – «средний».	Подходит для регулярного использования	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки; 3) Повышение температуры до T*.	При режиме «OWM» сохраняется высокий аминокислотный состав биоудобрений, но обеззараживание сырья не такое полное, как при «OHM». Более мягкий по сравнению с «OHM» контроль за температурой (1 ⁰ в час)
«Optimum hot medium» (OHM) – «Оптимальный»: по температуре – «горячий», по скорости образования биогаза – «средний».	Подходит для регулярного использования	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки.	Повышенная скорость разложения сырья и, следовательно, более высокий выход биогаза чем при «OWM». Более строгий по сравнению с «OHM» контроль за температурой. (0,5 ⁰ в час)
«Optimum cold medium» (OCM) – «Оптимальный»: по температуре – «холодный», по скорости образования	1) Как дополнительный модуль при малой дозе загрузки. 2) «Аварийный» - при поломке, протечке	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки; 3) Повышение температуры до T* и M*.	Этот режим можно так же использовать в летних условиях при малом кол-ве отходов, когда нужен постоянный, но небольшой выход биогаза. Тем самым можно экономить на отоплении.

Режим работы БГУ	Условия использования	Рекомендации по улучшению эффективности	Примечание
биогаза – «медленный».	отопительной системы. 3) Работа зимой (в суровых условиях) когда нет возможности нагреть до мезофильного и термофильного температурных режимов.		
«Critical hot fast» (CHF) – «Критичный»: по температуре – «горячий», по скорости образования биогаза – «быстрый».	1) Большая площадь сельскохозяйственных угодий и пахотных земель. 2) Значительное количество откормочных мест. 3) Предприятие с значительным выходом биотходов.	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки; 3) Повышение температуры до T* и M*.	
«Critical ecological warm» (CEW) – «Критичный», «экологичный»: по температуре – «тёплый».	Высокий аминокислотный состав биоудобрений и полное обеззараживание сырья.	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки.	При улучшении эффективности падает чистота обеззараживания сырья.
«Critical ecological hot» (CEH) – «Критичный», «экологичный»: по температуре – «горячий».	Полное обеззараживание сырья.	1) Уменьшение влажности; 2) Уменьшение дозы загрузки.	При улучшении эффективности (пункты 1,2) падает чистота обеззараживания сырья. Повышенная скорость разложения сырья и, следовательно, более высокий выход биогаза по сравнению с «CEW».

В период опытной эксплуатации были опробованы режимы – OWM; OHM; OCM; CEW; SEN. Режим CHF не был опробован по причине отсутствия соответствующего данной вязкости загрузочного устройства.

3.2 Результаты анаэробного сбраживания различных субстратов на БГУ-100. Эффективность технологии

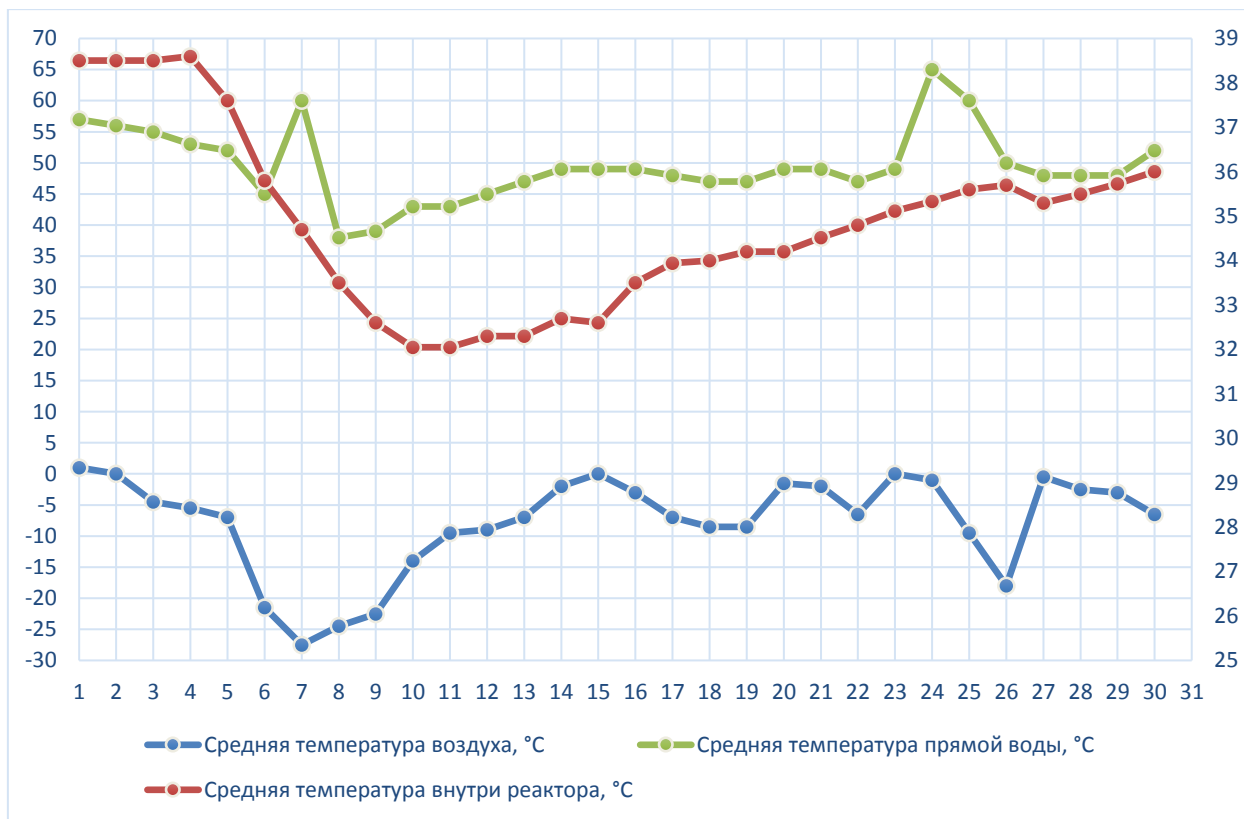
Ниже приведены таблица показателей работы БГУ-100, графики основных характеристик, а также ежедневные отчеты с оценкой ежедневной эффективности работы БГУ-100 для навоза КРС и фекальных стоков.

Таблица 3.3 – Основные параметры работы БГУ-100

Дата	Температура днем	Температура ночью	Температура внутри реактора	Ежесуточная загрузка, кг	Ежесуточный выход биогаза
1.01	1	1	38,5	2000	44
2.01	1	-1	38,5	2000	41
3.01	-6	-3	38,5	1000	46
4.01	-5	-6	38,6	1000	39
5.01	-13	-1	37,6	1000	38
6.01	-24	-19	35,8	1000	38
7.01	-27	-28	34,7	2000	40
8.01	-22	-27	33,5	2000	41
9.01	-20	-25	32,6	2000	40
10.01	-11	-17	32,05	1000	40
11.01	-8	-11	32,05	1000	41
12.01	-10	-8	32,3	1000	41
13.01	-7	-7	32,3	1000	43
14.01	-1	-3	32,7	1000	42
15.01	-1	1	32,6	1000	43
16.01	-3	-3	33,5	1000	44
17.01	-5	-9	33,94	1000	45
18.01	-8	-9	34	1000	46
19.01	-8	-9	34,2	1000	46

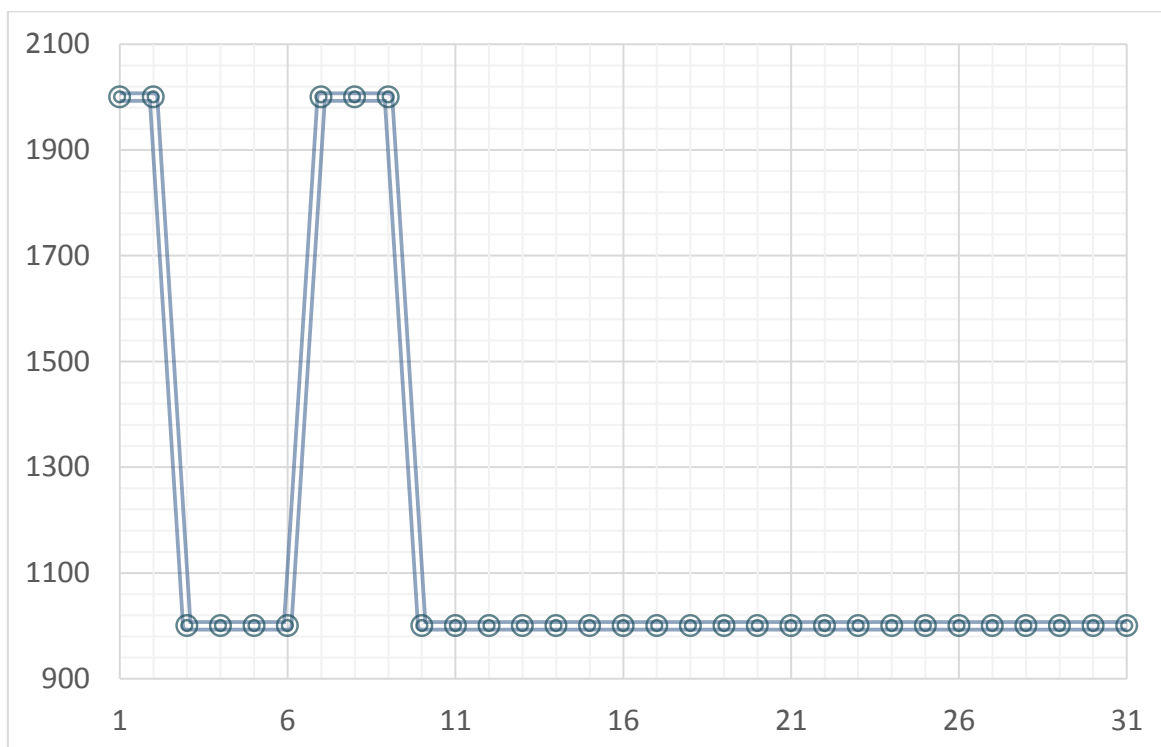
20.01	-2	-1	34,2	1000	47
21.01	-3	-1	34,52	1000	44
22.01	-3	-10	34,8	1000	46
23.01	1	-1	35,12	1000	47
24.01	0	-2	35,33	1000	48
25.01	-11	-8	35,6	1000	48
26.01	-15	-21	35,7	1000	47
27.01	1	-2	35,3	1000	48
28.01	-3	-2	35,5	1000	50
29.01	-3	-3	35,73	1000	52
30.01	-10	-3	36	1000	54
31.01				1000	55

График зависимости температуры внутри реактора от температуры наружного воздуха в январе 2017 года



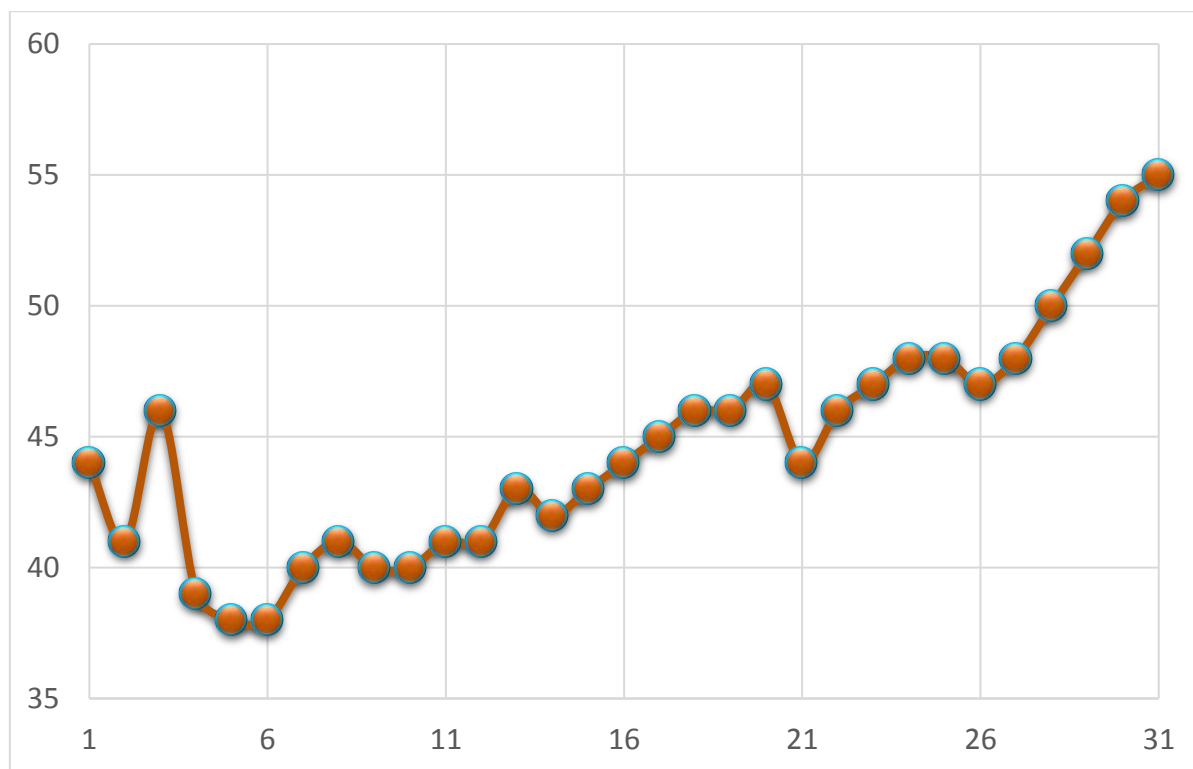
На графике видно задержку теплопередачи через стенку метантенка при резком понижении температуры окружающей среды. Так как тепловая изоляция несовершенна, из-за несоответствия конструкторской документации, такой характер сопротивления теплопередаче мог быть достигнут исключительно из-за свойств стенки реактора (благодаря свойствам стеклопластика).

График суточной загрузки метантенка в январе 2017 года



В январе месяце осуществлялась загрузка навозом КРС ООО «Золотая Нива» и фекальными стоками городских очистных сооружений, за данный период был достигнут физический объем реактора – около 70 м^3 , выгрузка в данный период не осуществлялась.

График суточного выхода биогаза (горючего газа, теплотворной способностью 22МДж/м³, содержание метана свыше 50%)



Выход биогаза зависит от качества сырья, наблюдается небольшое падение выхода биогаза во время загрузки фекальных стоков из-за недостатка питательных веществ, далее при разбавлении навозом КРС – сырьем с высоким содержанием питательных веществ, выделение биогаза стабилизируется и увеличивается.

В феврале БГУ-100 была произведена отработка одновременной загрузки и выгрузки субстрата, обновление фундаментального субстрата на 50% = 35 м³. Работы были закончены 08.03.2017.

Выход на непрерывный номинальный режим работы БГУ-100 (загрузки-выгрузки со стабильной генерацией газа, непрерывной работой котла и периодическим включением газопоршневой электростанции) на фундаментальном субстрате произошел 22.03.2017.

Газопоршневая электростанция запущена в режиме холостого хода 27.02.2017, введена в режим генерации электроэнергии на смеси биогаза и пропана 01.12.2017 года. По результатам опытной эксплуатации

газопоршневой электростанции можно сделать вывод о невозможности ее стабильной работы на неочищенном биогазе, но о ее стабильной работе при обогащении биогаза пропаном в соотношении примерно 70/30.

Пробы полученных удобрений были переданы в лабораторию для:

- определения содержания токсичных элементов;
- определения содержания остаточных количеств пестицидов;
- определения индекса санитарно-показательных микроорганизмов;
- определения наличия патогенных и болезнетворных микроорганизмов, жизнеспособных яиц и личинок гельминтов;
- определения цист кишечных патогенных простейших;
- определения pH;
- определения массовой доли питательных веществ:
 - азота общего — по ГОСТ 26715;
 - фосфора общего — по ГОСТ 26717;
 - калия общего — по ГОСТ 26718.

Результаты санитарно-эпидемиологического исследования удобрения будут получены не раньше 25.05.2017.

За апрель месяц было получено (рисунок 1) и упаковано (рисунок 2) около 2 500 кг удобрений (около 6 м³, 1 200 мешков).



Рисунок 3.1 – Вид эфлюента поле обработки в БГУ-100.



Рисунок 3.2 – Упаковка эфлюента.

Ниже приведены таблица показателей работы БГУ-100, графики основных характеристик, а также ежедневные отчеты за апрель месяц с оценкой ежедневной эффективности работы БГУ-100 для навоза КРС, результаты лабораторных исследований проб на определение питательной среды.

Таблица 3.4 – Основные параметры работы БГУ-100

Дата	Температура днем	Температура ночью	Температура внутри реактора	Ежесуточная загрузка, кг	Ежесуточный выход биогаза
1.04	3,6	-2,2	41	1000	35
2.04	13,2	2	41	1000	37
3.04	9,5	6,5	41	1000	33
4.04	5,5	3	41	1000	34
5.04	11	3,6	41	1000	35
6.04	12	6	41	1000	32
7.04	8	5,9	41	1000	37
8.04	5,5	2	41	1000	35
9.04	5,5	0	41	1000	33
10.04	9,4	4,5	41	1000	30
11.04	11	6	41	1000	37
12.04	8,5	3,6	41	1000	35
13.04	7,5	2	41	1000	38
14.04	6,5	3,6	41	1000	35
15.04	2	1	41	1000	37
16.04	1,7	0	41	1000	33
17.04	2	-1	41	1000	30
18.04	5,5	-2,2	41	1000	35
19.04	1	-1	41	1000	34
20.04	3,5	-1	41	1000	37
21.04	2	-1	41	1000	35
22.04	4	0	41	1000	33
23.04	5,5	1,7	41	1000	37
24.04	5,5	-1,5	41	1000	32
25.04	8,6	-2	41	1000	29
26.04	9	6	41	1000	33
27.04	6,4	5,5	41	1000	36
28.04	6,5	5	41	1000	35
29.04	17,1	7	41	1000	33
30.04	13	9,4	41	1000	36

График зависимости температуры внутри реактора от температуры наружного воздуха в апреле 2017 года

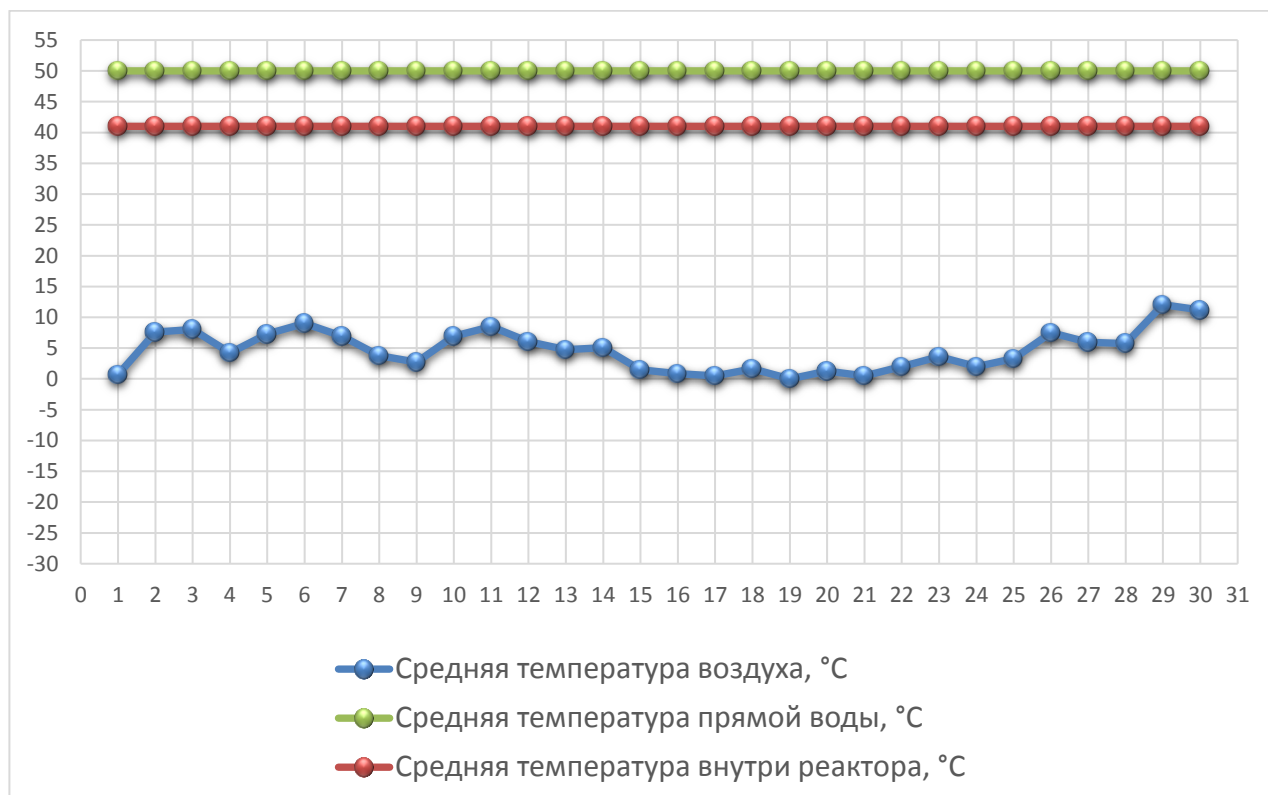
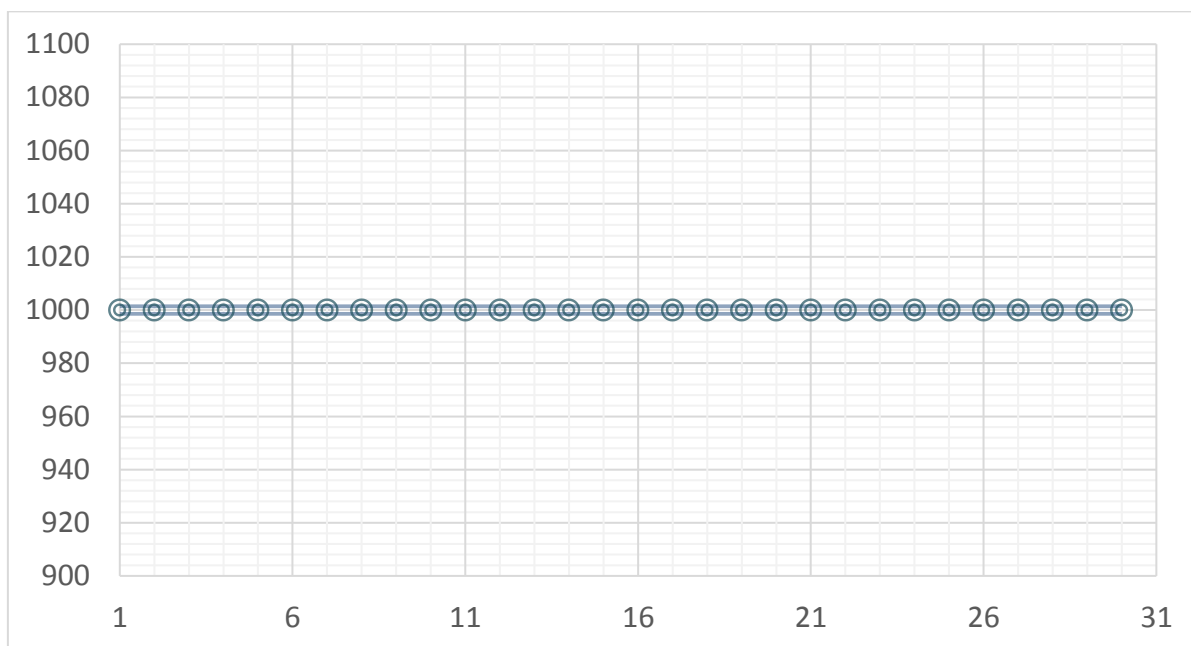


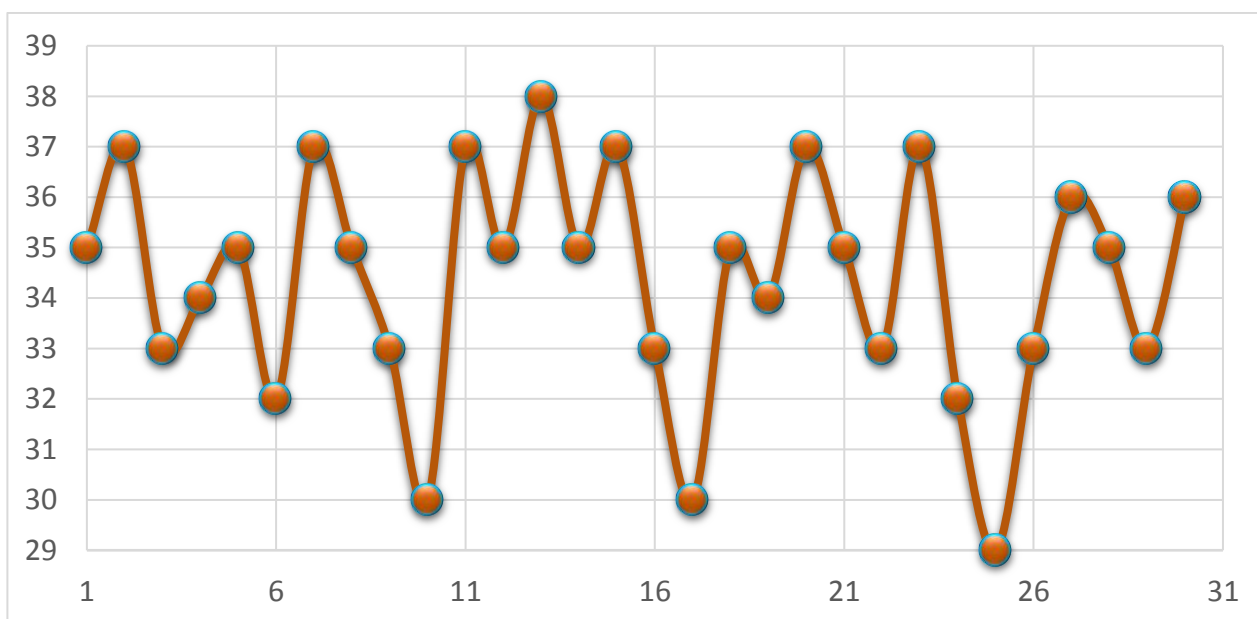
График показывает, что при температурах окружающего воздуха выше 0°C, температура внутри реактора поддерживается постоянной из-за теплоизоляционных свойств стеклопластика.

График суточной загрузки метантенка в апреле 2017 года



В апреле месяце осуществлялась ежесуточная загрузка навозом КРС ООО «Золотая Нива» и ежесуточная выгрузка эффлюента, за данный период физический объем реактора поддерживался на одном уровне – около 60 м³.

График суточного выхода биогаза (горючего газа, теплотворной способностью 22МДж/м³, содержание метана свыше 50%) в апреле 2017 года



Выход биогаза наблюдается ниже, чем в январе из-за меньшего объема сбраживаемого сырья.

В мае была произведена апробация установки ультразвуковой подготовки субстрата к навозу КРС ООО «Золотая Нива» была добавлена измельченная в ней костра льна в объеме 1 м³.

Результаты представлены на графике ниже.

График суточного выхода биогаза (горючего газа, теплотворной способностью 22МДж/м³, содержание метана свыше 50%)

в мае 2017 года



На графике видно, что в период добавления костры льна произошла активность метаногенных микроорганизмов, что привело к увеличению суточного выхода биогаза. Прежде всего, это связано с высокой питательной ценностью и высокой степенью предварительного разложения костры.

В июне 2017 года было проведено сбраживание активного ила очистных сооружений ПАО «Дорогобуж» в субстрате из навоза КРС ООО «Золотая Нива» в соотношении 50/50.

Результаты представлены на графике ниже.

График суточного выхода биогаза (горючего газа, теплотворной способностью 22МДж/м³, содержание метана свыше 50%)

в июне 2017 года



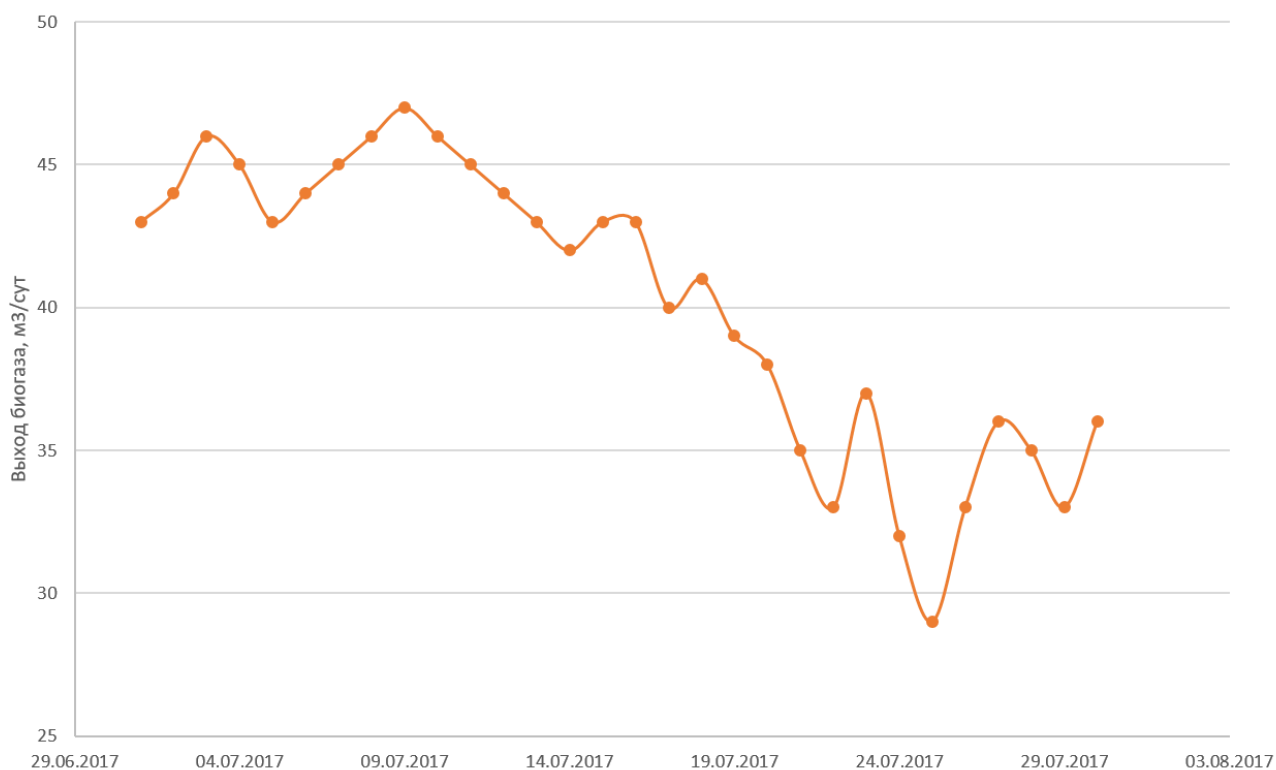
На графике видно, что в период разбавления субстрата КРС активным илом произошла активность метаногенных микроорганизмов, что привело к увеличению суточного выхода биогаза. Это связано с высокой активностью аэробного активного ила, который, в начальном периоде, быстро уничтожая кислород, разлагает сложные вещества полимеры до более простых, тем самым, подготавливая питательную и бескислородную среду для активного роста облигатных анаэробных метаногенов. Эффективность процесса возрастает, но при этом стоит учитывать высокое содержание тяжелых металлов в активном иле (нежелательно превышение его содержания в субстрате более 50%).

В июле 2017 года было проведено сбраживание птичьего помета ЗАО «ПТИЦЕФАБРИКА ПРИГОРСКОЕ» с навозом КРС ООО «Золотая Нива» в соотношении 50/50.

Результаты представлены на графике ниже.

График суточного выхода биогаза (горючего газа, теплотворной способностью 22МДж/м³, содержание метана свыше 50%)

в июле 2017 года



На графике видно, что при сбраживании птичьего помета с навозом КРС выход газа увеличивается, это связано с большим содержанием питательных веществ в птичьем помете, но стоит, также учитывать высокую токсичность птичьего помета, поэтому, при его сбраживании для дезактивации ингибирующих интермедиатов были добавлены микроорганизмы типа IND, искусственно выведенные в лабораторных условиях.

3.2 Результаты лабораторных анализов, испытания на полях полученных удобрений

Пробы удобрений на основе различных субстратов были переданы в лаборатории для исследований на предмет соответствия ГОСТу при

использовании эффлюента в качестве органического удобрения.

В таблицах ниже приведены результаты анализов.

Таблица 3.5 – Результаты лабораторного исследования эффлюента БГУ-100

Наименование показателя	Метод испытания	Содержание	Требования ГОСТ для удобрений на основе эффлюента навоза КРС, не менее, г/л
Массовая доля сухого вещества, %	ГОСТ 26713	35,3	-
Массовая доля золы, %	ГОСТ 26714	8,8	-
Массовая доля органического вещества, %	ГОСТ 27980	45,6	-
Массовая доля макроэлементов, %			
Азота аммиачного	ГОСТ 26716	0,16	-
Азота общего	ГОСТ 26715	2,00	0,3
Фосфора (P ₂ O ₅) общего	ГОСТ 26717	1,29	0,1
Калия (K ₂ O) общего	ГОСТ 26718	0,82	0,2
рН	ГОСТ 27979	7,4	6-8
Соотношение С:N		22,8	-

Таблица 3.6 – Сравнение результатов испытаний пробы потенциального удобрения «Активный ил и навоз крупного рогатого скота в соотношении 50/50» с требованиями ГОСТ на удобрения на основе эффлюента навоза, помета и осадков сточных вод

Наименование показателя	Результат испытаний, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе эффлюента навоза КРС, не менее, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе эффлюента помета птичьего, не менее, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе осадков сточных вод, не менее, г/л
Массовая доля общего азота	2,69	0,2	0,3	0,6
Массовая доля общего фосфора	1,61	0,1	0,1	0,7
Массовая доля общего калия	0,52	0,2	0,1	0,1
рН	7,42	6-8	6-8	6-8
Массовая доля органического вещества, на сухое вещество, не менее	71,5*	70	70	30

* – Справочные данные [2].

По результатам лабораторного анализа содержания питательных веществ в смеси активного ила и навоза КРС достаточно для использования его в качестве органического удобрения.

Таблица 3.7 – Сравнение результатов испытаний пробы потенциального удобрения «Навоз КРС и птичий помет в соотношении 50/50» с требованиями ГОСТ на удобрения на основе эффлюента навоза, помета и осадков сточных вод

	Результат испытаний, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе эффлюента навоза КРС, не менее, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе эффлюента помета птичьего, не менее, г/л	Требования ГОСТ для удобрений на основе осадков сточных вод
Массовая доля общего азота	9,95	0,2	0,3	0,6
Массовая доля общего фосфора	4,19	0,1	0,1	0,7
Массовая доля общего калия	4,95	0,2	0,1	0,1
рН	6,15	6-8	6-8	6-8
Массовая доля органического вещества, на сухое вещество, не менее	64*	70	70	30

* – Справочные данные [2].

По результатам лабораторного анализа содержания питательных веществ в смеси навоза КРС и птичьего помета достаточно для использования его в качестве органического удобрения.

По результатам опытной эксплуатации были составлены технические условия ТУ 20.15.80.110-79926717-2017 «ОРГАНИЧЕСКОЕ УДОБРЕНИЕ (ЭФФЛЮЕНТ) «ОКТАРИН». Получен сертификат. Разработана торговая марка (см. рисунок 3.1)

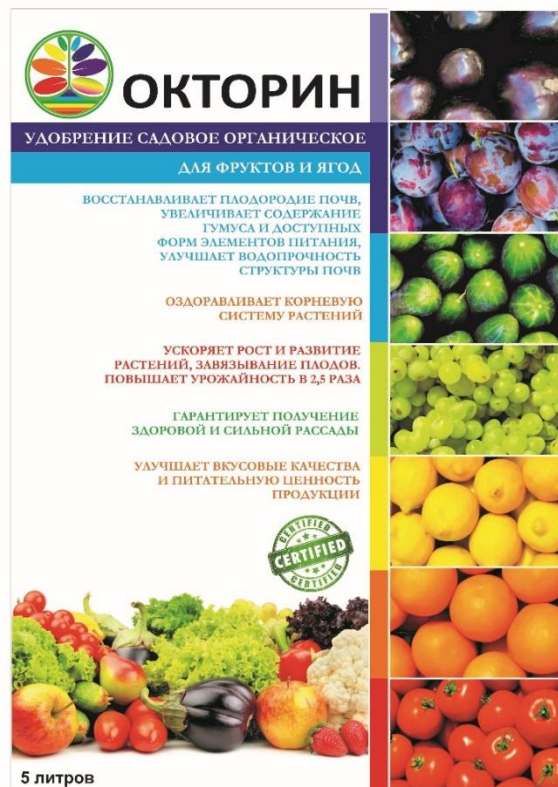
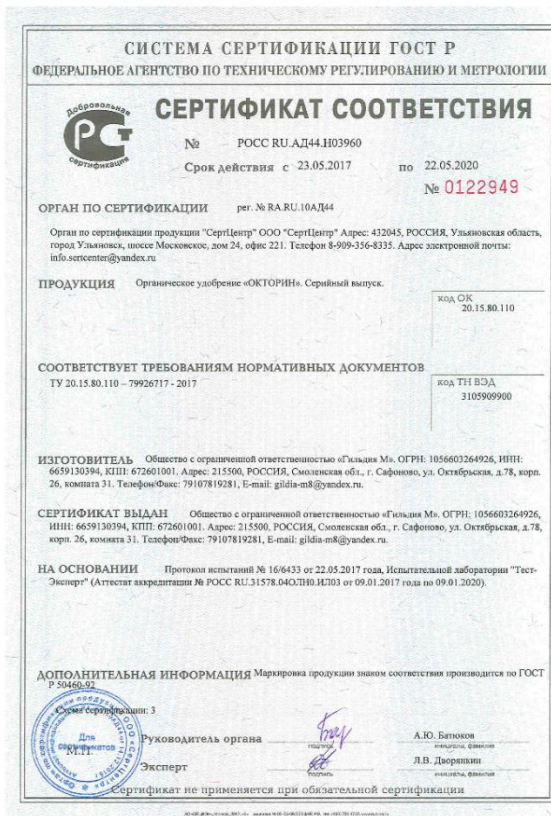


Рисунок 3.3 – Сертификат соответствия удобрения «ОКОРИН» техническим условиям и упаковка.

Заключение

1. В результате опытной эксплуатации БГУ-100 были достигнуты стабильные параметры работы БГУ-100. Отработаны основные режимы ее работы, запущено в работу и опробовано в суровых климатических условиях оборудование, проведены мероприятия по устранению возможных аварийных ситуаций. Разработаны устойчивые к внешним факторам технологии анаэробной биопереработки органических субстратов различной способности к разложению, произведена апробация трех эффективных методов катализации процессов переработки и методов повышения эффективности процессов, каждый из них дал положительный эффект.
2. По результатам, проведенного лабораторного анализа, полученных потенциальных удобрений, можно сделать следующее заключение: При использовании таких питательных ко-субстратов, как навоз крупного рогатого скота и птичий помет в сочетании с активным илом, качество органического удобрения соответствует требованиям ГОСТ и ТУ. Активный ил, в свою очередь, помогает процессу сохранять стабильность и быть нечувствительным к попаданию кислорода, сохранять рН в допустимых пределах.
3. В течение 14-месячного периода опытной эксплуатации:
 - 1) Подтверждены расчетные технические параметры производительности установки (Приложение № 1),
 - 2) Выявлены неоптимальные системы и узлы опытной установки приводящих к снижению технических параметров системы. Составлена Дефектная ведомость выявленных недостатков с планом мероприятий по их устранению.
 - 3) Разработано Техническое задание на корректировку конструкторской и рабочей документации анаэробного реактора АР-100 в соответствии с которым сформирован промышленный образец серийной продукции – анаэробный реактор АР-100;

4) Подготовлено типовое технико-коммерческое предложение биотехнологического комплекса БИОКОМ-100 на базе анаэробного реакторов AP-100

Список литературы

1. Горелова О.М., Титова К.Ю. Исследования по утилизации активного ила // Ползуновский вестник №4 Т.1 2015г. С114-118.
2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ КОНВЕРСИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ОТХОДОВ ЖИВОТНОВОДСТВА И ПТИЦЕВОДСТВА В БИОГАЗ (НА ПРИМЕРЕ РФ) / Корзникова, Блохин, Козлов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Химия. Биология. Фармация .— 2008 .— №2 .— С. 106-109
3. Прикладная экобиотехнология [электронный ресурс]: учебное пособие: в 2 т. Т.1 / А.Е. Кузнецов [и др.]. – 2-е изд. (эл.). – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 629 с. : ил., [4] с. цв. вкл. – (Учебник для высшей школы).
4. ГОСТ 33380-2015. Удобрения органические. Эффлюент. Технические условия
5. ГОСТ Р 54651-2011. Удобрения органические на основе осадков сточных вод. Технические условия.

**Технические характеристики БГУ-100
по результатам опытной эксплуатации**

№№ пп	Показатель	Ед. изм.	Проектные расчеты	Результаты натурных испытаний	Отклонение значений + / -, %
1.	Переработка органических отходов на основе КРС (влажность 75%)	Тонн/сутки	5-7	5	0... - 15 %
2.	Производство эффлюента (влажность 10%)	Тонн/сутки	0,75	1,5	+ 100 %
3.	Производство биогаза (содержание метана более 60%)	м ³ /сутки	100	100	-
5.	Генерация электрической энергии, всего	КВт·ч	10	10	-
	Из них – на технологические нужды (max – в зимний период)	КВт·ч	3,0	1,5	- 100 %
6.	Генерация тепловой энергии	Гкал в час	0,008	0,01	+ 20 %
	Из них – на технологические нужды (max – в зимний период)	Гкал в час	0,003	0,002	- 33 %
7.	Производство органического удобрения «ОКТОРИН»	Тонн/сутки	0,75	1,5	+ 100 %

