

УДК 66.098.4

А.Р. Очеретнюк,
Н.Д. Волошин, д-р техн. наук, проф.,
В.В. Кармазина, канд. физ.-мат. наук, доц.

Днепродзержинский государственный технический университет, г. Днепродзержинск, Украина,
e-mail: ocheretn@rambler.ru

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫХ БИОМИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

A.R. Ocheretnyuk,
N.D. Voloshin, Dr. Sci. (Tech.), Professor,
V.V. Karmazina, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate
Professor

Dneprodzerzhinsk State Technical University, Dniprodzerzhinsk, Ukraine, e-mail: ocheretn@rambler.ru

OPTIMIZATION OF THE METHODS OF NONPOLLUTING BIOMINERAL FERTILIZERS PRODUCTION

Цель. Исследование влияния предварительной химической и механической обработки анаэробно сброживаемой смеси из вторичного сырья на динамику и скорость выхода биогаза методом регрессионного анализа и лабораторных исследований. Определение влияния факторов, влияющих на качество процесса анаэробного сброживания, в частности динамику и скорости выхода биогаза, по полученным результатам.

Методика. Методом анаэробного сброживания биоминеральной смеси, которая состояла из куриного помета, уплотненного активного ила, фосфорсодержащего осадка сточных вод, получено экологически чистое биоминеральное удобрение. Исследовали влияние предварительной обработки биоминеральной смеси кальцийсодержащим шламом и диспергированием на интенсивность процессов анаэробного брожения, выход биогаза с получением биоминерального удобрения.

Результаты. Разработаны математические модели процессов анаэробного брожения биоминеральной смеси, доказана их адекватность экспериментальным данным. Установлено, что наиболее эффективным способом оптимизации технологии получения биоминерального удобрения является метод предварительной обработки кальцийсодержащими шламами и диспергирование с последующим подогревом смеси. Ему почти не уступает метод предварительной обработки кальцийсодержащими шламами с подогревом биоминеральной смеси. Менее эффективным методом оптимизации процесса получения биоминерального удобрения является метод предварительной обработки кальцийсодержащими шламами и диспергирование без последующего подогрева смеси, но, в сравнении с классическим методом без предварительной обработки, его можно применять в период с мая по сентябрь, что позволит экономить электроэнергию.

Научная новизна. Методом регрессионного анализа установлено влияние предварительной обработки кальцийсодержащими шламами, диспергирования и последующего подогрева биоминеральной смеси на скорость и динамику выхода биогаза.

Практическая значимость. Математические зависимости процессов получения биоминерального удобрения путем анаэробного брожения биоминеральной смеси с предварительной обработкой кальцийсодержащими шламами, диспергированием, последующим подогревом смеси могут использоваться для расчетов оптимальных методов при выборе способов предварительной обработки сброживаемой смеси в промышленности. Установлено положительное влияние метода предварительной обработки кальцийсодержащими шламами и диспергирования без последующего подогрева на скорость и динамику выхода биогаза, который позволяет в промышленных условиях снизить расходы электроэнергии в период с мая по сентябрь.

Ключевые слова: анаэробное брожение, биоминеральная смесь, диспергирование, кальцийсодержащие шламы

Постановка проблемы. В последнее время с ухудшением экологической ситуации наблюдается деградация земель, снижение плодородия почвы. Для улучшения свойств земли, повышения урожайности сельскохозяйственных культур используют биоминеральные удобрения [1].

В то же время в Украине существует проблема накопления отходов производства, в частности осадков сточных вод коммунального хозяйства, кальцийсодержащих шламов водоподготовки, птичьего помета. Эти отходы насыщены питательными макро-

микроэлементами, их применение в качестве вторичного сырья для производства биоминеральных удобрений [2,3] позволит решить вопросы улучшения качества почв и экологии окружающей среды.

Выделение нерешенной проблемы. Использование процессов анаэробного сброживания позволяет получать экологически чистые обеззараженные удобрения, в которых полезные вещества находятся в форме, которая лучше усваивается растениями. Этот метод обеспечивает наибольшее обеззараживание остатка и устранение патогенных микроорганизмов. В трудах Плахотника О.М., Ютиной А.С., Бондаря И.Л., Сачко В.В., Гюнтера Л.И., Гольдфарба Л.Л. говорится об экологических аспектах использования процессов

анаэробного брожения в технологии получения биоминеральных удобрений. В процессе анаэробного сбраживания выделяется биогаз, который может использоваться для обогрева биореактора, что позволяет экономить на электроэнергии. Недостатком существующих биореакторов является продолжительность процессов сбраживания (не менее 30 суток).

Предварительная обработка сбраживаемой биоминеральной смеси позволит получать удобрение в меньший интервал времени. Известно, что основным показателем качества процесса сбраживания является динамика и скорость выхода биогаза. Чем выше скорость выхода биогаза, тем качественнее происходят процессы сбраживания [4]. Так, с повышением скорости выхода биогаза можно говорить о сокращении времени процессов получения биоудобрения.

Предварительная химическая обработка сбраживаемой смеси кальцийсодержащими шламами водоподготовки способствует снижению ее влаги, что приводит к увеличению полезного объема биореактора [5].

Также известно, что чем мелкодисперснее смесь, тем качественнее происходят процессы сбраживания [6]. Использование механических методов предварительной обработки биоминерального сырья, в частности диспергирования, позволит получить смесь с меньшей дисперсией и ускорить процессы анаэробного сбраживания.

Использование в технологии получения биоминеральных удобрений вторичного сырья, в том числе отходов коммунального хозяйства, с применением процессов анаэробного сбраживания является актуальным, т.к. позволит получать обеззараженные, экологически чистые удобрения для повышения плодородия почв с одновременной утилизацией отходов промышленности. Оптимизация процессов получения биоминеральных удобрений позволит сократить во времени процессы производства, экономить электроэнергию.

Анализ последних исследований. Известен способ производства биогаза и органических удобрений при сбраживании многокомпонентного субстрата, в котором используются процессы анаэробного брожения с предварительной обработкой биоминеральной смеси. Однако время брожения достигает 25 суток, что усложняет использование такого метода в технологии получения биоминеральных удобрений, а предварительный помол смеси в процессе подготовки до частиц не крупнее 50 мм не позволяет ускорить процессы брожения [4].

О проблемах захоронения бытовых и промышленных отходов в России [7] и других странах говорится в работах Боровского Е.Э., Кудельской Г.А., Марковой Н.П., Памелько Г.М., в Украине Вакала С.В., Астрелина И.М., Гончарука В.В., Волошина Н.Д.

Ученые Вакал С.В., Муравин Э.А., Евилевич А.З., Евилевич М.А., Иванченко А.В. утверждают, что использование вторичного сырья в технологии получения биоминеральных удобрений приведет не только к улучшению экологической ситуации в окружающей среде, но и поможет повысить плодородие почв, урожайность сельскохозяйственных культур.

Столяренко Г.С., Легом Ю.Г. разработана энерго-сберегающая биоконверсионная технология переработки отходов сельскохозяйственной продукции с использованием анаэробного сбраживания в термофильном режиме.

Выделение нерешенной ранее части общей проблемы. Наибольшее применение для получения биоминеральных удобрений нашел биореактор с мезофильным (при температуре 32–35°C) режимом. Мезофильный режим является менее энергоемким, однако не позволяет применять метантенки меньшего объема.

При использовании мезофильного режима наблюдается низкая скорость распада органических веществ, длительность процесса брожения достигает 50 дней, за счет чего увеличивается требуемый объем сооружений.

Применение механического обезвоживания и химического кондиционирования нестабилизированных биологических осадков вместо процессов анаэробного брожения энергетически менее выгодно. Существует проблема оптимизации процессов анаэробного брожения в мезофильном режиме для получения экологически чистых биоминеральных удобрений.

Формулирование цели работы. Целью работы является исследование влияния предварительной химической и механической обработки анаэробно сбраживаемой смеси из вторичного сырья на динамику и скорость выхода биогаза методом регрессионного анализа и лабораторных исследований. Определение влияния факторов, влияющих на качество процесса анаэробного сбраживания, в частности динамику и скорости выхода биогаза, по полученным результатам.

Изложение основного материала. Лабораторная установка анаэробного сбраживания состояла из стеклянного цилиндра емкостью 1 дм³ для сбраживания, герметично плотно закрытого резиновой пробкой, к которой присоединяли трубу для выхода биогаза, емкости для сбора биогаза, мерного цилиндра для измерения объемов вытесненной биогазом воды. Емкость для сбраживания устанавливалась на электромагнитную мешалку, накрывалась теплоизолирующим колпаком. Для поддержания постоянной температуры мезофильного режима (33°C) сбраживания использовался нагреватель с терморегулятором, погруженным в биореактор [8]. Два раза в сутки включалась мешалка, интенсивность перемешивания составляла 2,3 с⁻¹. Одновременно было установлено четыре лабораторных установки анаэробного сбраживания.

В исследованиях использовалось следующее вторичное сырье:

- а) избыточный активный ил очистных сооружений г. Днепропетровска;
- б) фосфорсодержащий осадок, образовавшийся после обработки сточных вод кальцийсодержащими шламами, отобранными из шламонакопителя цеха водоподготовки ТЭЦ предприятия ПАО „Днепро-Азот“;
- в) куриный помет с предприятия ОАО с ИИ „Орель-Лидер“.

Для сбраживания использовали биоминеральную смесь при следующем соотношении, вес. %: куриный помет – 76; избыточный активный ил – 20; фосфорсодержащий осадок из сточных вод, образовавшийся после осаждения фосфатов шламом химводоподготовки ТЭЦ – 4 [9]. Биоминеральную смесь разделили поровну на четыре части и поочередно загружали в биореакторы.

Первая часть не подвергалась дополнительной обработке и сразу загружалась в первый биореактор. Вторая часть обрабатывалась кальцийсодержащими шламами. После 1,5 час отстаивания в радиальном отстойнике, образовавшийся осадок погружался во второй биореактор. Третья и четвертая части биоминеральной смеси также обрабатывались кальцийсодержащими шламами ТЭЦ и подвергались механической обработке – диспергированию в течение 2-х минут. Диспергированная смесь отстаивалась в течение 2,5 час в отстойнике. Образованный после отстаивания уплотненный осадок загружался в третий и четвертый биореакторы.

В биореактор загружалась исследуемая смесь, герметично закрывалась пробкой с трубкой, которая соединяла цилиндр и приемники газа. Приемники газа заполнялись водой. В цилиндр устанавливался нагреватель с терморегулятором. Цилиндр ставился на электромагнитную мешалку и накрывался пенопластовым колпаком. После этого цилиндр и все со-

единения, каналы проверялись на герметичность. При достижении заданной температуры в биореакторе выполнялись замеры объема выделяемого газа в цилиндре. Главной отличительной особенностью четвертого биореакторов было то, что четвертый биореактор дополнительно не подогревался, в отличие от предыдущих трех. Объем газа замерялся по объему вытесненной жидкости (воды) из приемника газа. Каждые сутки в мерном цилиндре с водой контролировался суточный объем образовавшегося биогаза. Эксперимент длился на протяжении 30-ти дней.

На протяжении первых 12-ти дней выделение биогаза во всех четырех биореакторах увеличивалось с разной скоростью (рис. 1). В отличие от исследований, проведенных авторами [6] по получению биогаза из биоминеральной смеси при высоких температурах в отсутствие предварительной химической и механической обработки сбраживаемой смеси, скорость получения биогаза на рассматриваемых установках значительно выше. Данные эксперимента свидетельствуют о том, что после 20-го дня проведения эксперимента выделение биогаза во всех четырех биореакторах значительно уменьшалось и его получение становится нецелесообразным. Несмотря на это, суммарное количество выделенного газа за 20 дней выше, чем суммарное количество газа, полученное авторами [6] за 50 дней.

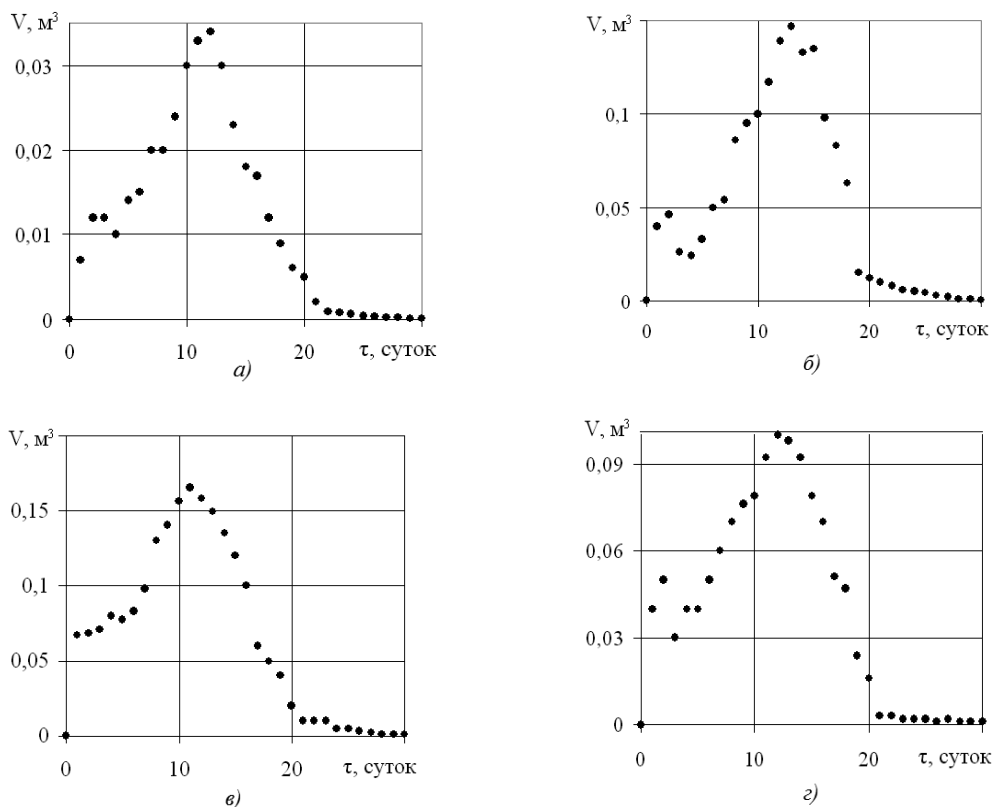


Рис. 1. Динамика объема (V) выделенного биогаза из сброженной смеси по времени (τ) в пересчете на 1 кг сухого вещества: а – без предварительной обработки; б – обработанной кальцийсодержащими шламами; в – обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной; г – предварительно обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева

Процесс брожения на четырех установках проходил с разной скоростью выделения биогаза. На всех установках максимальное выделение биогаза (из 1 кг сухого вещества) наблюдалось на одиннадцатый – тринадцатый дни: 0,034 м³ – на установке без предварительной обработки смеси (рис. 1, а); 0,147 м³ – на установке со смесью, обработанной кальцийсодержащими шламами (рис. 1, б); 0,165 м³ – на установке со смесью, обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной (рис. 1, в); 0,1 м³ – на установке, в которой смесь предварительно обработана кальцийсодержащими шламами и диспергирована без последующего подогрева (рис. 1, г). После двадцатого дня проведения эксперимента выделение биогаза на всех четырех установках становится в разной степени малым: меньше, чем 0,005 м³, – на установке без предварительной обработки смеси (рис. 1, а); меньше, чем 0,015 м³, – на установке из смеси обработанной кальцийсодержащими шламами (рис. 1, б); меньше, чем 0,04 м³, – на установке со смесью, обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной (рис. 1, в); меньше, чем 0,024 м³, – на установке со смесью, предварительно обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева (рис. 1, г).

Установлено, что для получения максимального количества сброженного биоминерального удобрения и биогаза достаточно 20 суток.

При расчетах математических моделей процесса получения биоминеральных удобрений из вторичного сырья исходили из того, что в процессе анаэробного брожения происходит прирост микроорганизмов анаэробов, для которых основным продуктом питания являются органические вещества, с одновременным расходом органики. Поскольку происходят два взаимоисключающих процесса, наблюдаются максимальные скорости процессов сбраживания с повышенным объемом выхода биогаза.

На рис. 2, а представлена динамика накопления выхода биогаза из биоминеральной смеси от времени дополнительно необработанной; б – обработанной

кальцийсодержащими шламами; в – обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной; г – предварительно обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева.

Для полученных моделей значения коэффициента аппроксимации (R²) (рис. 2) близки к 1, что свидетельствует о высоких аппроксимативных качествах построенных моделей. Для достоверности проведена проверка на адекватность моделей данным исследований.

Для выработки рекомендаций по четырем используемым установкам целесообразно провести сравнительный анализ результатов исследований. С этой целью проведено математическое моделирование процессов анаэробного сбраживания биоминеральной смеси методом регрессионного анализа на базе полученных данных лабораторных исследований. Результатом являются уравнения, описывающие процесс накопления выхода биогаза по четырем установкам:

а) дополнительно необработанной

$$\hat{y} = 0,021x - 0,0365;$$

б) обработанной кальцийсодержащими шламами

$$\hat{y} = 0,0951x - 0,133;$$

в) обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной

$$\hat{y} = 0,1149x - 0,1498;$$

г) предварительно обработанной смеси кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева

$$\hat{y} = 0,0694x - 0,1103.$$

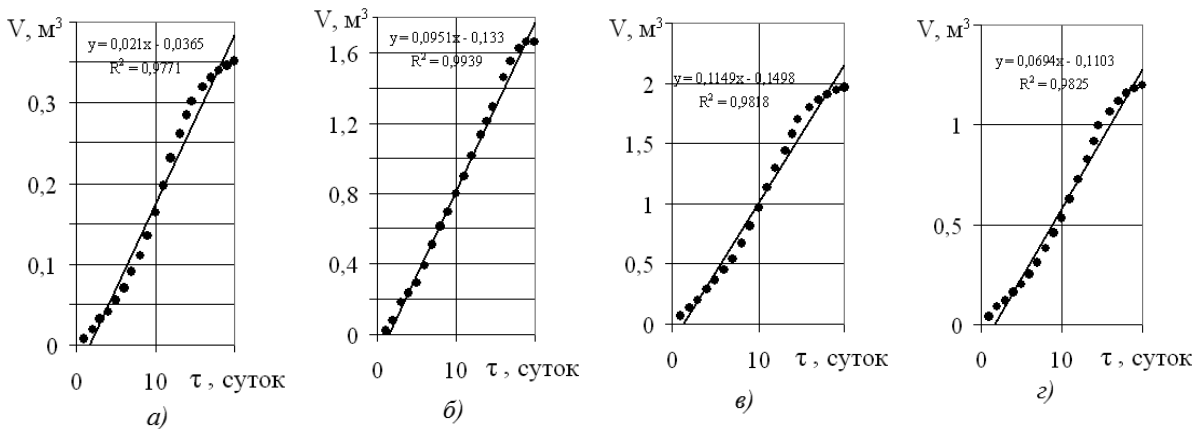


Рис. 2. Динамика накопления выхода биогаза (V) из биоминеральной смеси от времени (τ) в пересчете на 1 кг сухого вещества: а – дополнительно необработанной; б – обработанной кальцийсодержащими шламами; в – обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной; г – предварительно обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева

Проверка на адекватность для модели, которая описывает классический метод сбраживания (рис. 2, а), выполнена с использованием критерия Фишера. Расчетные значения критерия получены по формуле [10]

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} F_p = F(1, n-2) = \frac{(n-2) \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} = 767,334 ;$$

$$n = 20; \quad \hat{y} = 0,021x - 0,0365;$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n},$$

где y_i – данные лабораторных исследований.

Критическое значение критерия, при уровне значимости 0,95, получено по таблицам распределения Фишера или при использовании возможности электронных таблиц Microsoft Excel

$$F_{крит} = F(\alpha, K_1, K_2) = 4,14;$$

$$\alpha = 0,05; \quad K_1 = 1; \quad K_2 = n - 2 = 20 - 2 = 18.$$

Так как $F_p > F_{крит}$, то, с вероятностью 0,95, можно утверждать, что построенная математическая модель адекватна экспериментальным данным.

Для аналогичной проверки математической модели выхода биогаза из обработанной кальцийсодержащими шламами сбраживаемой смеси: $F_p = 2911,16$. Снова выполняется соотношение $F_p > F_{крит}$, что свидетельствует о том, что модель выхода биогаза (рис. 2, б)

$$\hat{y}_1 = 0,0951x - 0,133$$

из биоминеральной смеси дополнительно обработанной кальцийсодержащими шламами адекватна экспериментальным данным.

Для проверки на адекватность модели $\hat{y} = 0,1149x - 0,1498$, которая описывает динамику выхода биогаза из обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной сбраживаемой смеси (рис. 2, в), вычисляем $F_p = 969,12$. Из выполнения соотношения $F_p > F_{крит}$ следует, что утверждение про адекватность этой модели справедливо.

Аналогичные вычисления для проверки модели, $\hat{y} = 0,0694x - 0,1103$, которая описывает динамику выхода биогаза из обработанной кальцийсодержащими шламами сбраживаемой смеси без последующего подогрева (рис. 2, г), рассчитано значение критерия $F_p = 1008,94$, что свидетельствует об адекватности модели данным исследований.

Сочетание предварительной обработки кальцийсодержащих шламов и диспергирования позволяет увеличить накопление выхода биогаза из биоминеральной смеси и увеличить общий объем выхода биогаза с 0,35 до 2,01 м³ на 1 кг сухого вещества (рис. 3).

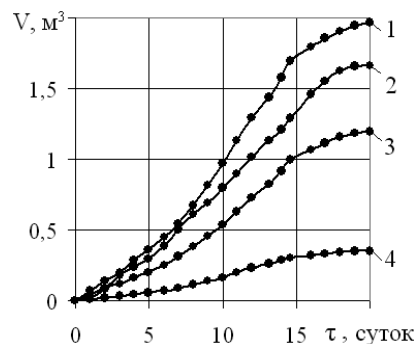


Рис. 3. Зависимость накопления биогаза (V) от времени (τ) брожения в пересчете на 1кг сухого вещества из смеси: 1 – обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной; 2 – обработанной кальцийсодержащими шламами; 3 – предварительно обработанной кальцийсодержащими шламами и диспергированной без последующего подогрева; 4 – предварительно не обработанной

Первый коэффициент в уравнениях (рис. 2) определяет скорость накопления газа в зависимости от времени. Анализ построенных моделей позволяет утверждать, что получение биогаза из предварительно обработанной смеси кальцийсодержащим шламом и диспергированной с подогревом наиболее оптимально (рис. 3). Ему почти не уступает процесс получения биогаза из предварительно недиспергированной смеси, обработанной кальцийсодержащим шламом с подогревом. В то же время, наименее продуктивным является классический метод получения биогаза из смеси, которую не обрабатывали кальцийсодержащими шламами и не диспергировали, с подогревом. В сравнении с классическим методом, получение биогаза из предварительно обработанной смеси кальцийсодержащим шламом и диспергированной без подогрева является значительно лучшим методом. Этот метод выполняли в летний период. Следовательно, для экономии электроэнергии целесообразно использование такого метода получения биогаза в теплое время года.

Полученный биогаз на всех четырех установках – высокого качества. Он имеет плотность 1,2110 м³/кг, до 60% метана и около 40% диоксида углерода, не учитывая другие примеси – сероводород, азот, кислород и др., содержание которых не превышает 1%, хорошо горит сине-голубым пламенем, с соответствующим запахом. Это позволяет его использовать в промышленности, для транспорта, в коммунальном хозяйстве.

В то же время, полученная сброженная смесь является удобрением с высокими показателями питательных элементов (в %: N_{общ} – 2,5; N_{ам} – 2,4; P₂O₅ – 3,9; K₂O – 3,0) и составом тяжелых металлов, не превышающих предельно-допустимой концентрации в почве [9].

Выводы и перспективы развития направления.

1. На основании лабораторных исследований доказана целесообразность проведения процесса получения сброженного биоминерального удобрения и биогаза за 20 суток.

2. Методом регрессионного анализа и лабораторных опытов исследовано влияние предварительной обработки кальцийсодержащими шламами и последующего диспергирования анаэробно сброживаемой биоминеральной смеси на динамику и скорость выхода биогаза. С вероятностью 0,95 (по критерию Фишера) можно утверждать, что построенные математические модели адекватны экспериментальным данным.

3. Для выработки рекомендаций проведен сравнительный анализ результатов исследований построенных моделей. Наиболее оптимальным является процесс получения биоминерального удобрения и биогаза с подогревом, диспергированием и с предварительной обработкой кальцийсодержащим шламом сброживаемой смеси. Такой метод позволяет получить до 2 м³ ценного биогаза на 1 кг сухого вещества. Ему почти не уступает процесс получения биогаза из предварительно недиспергированной смеси, обработанной кальцийсодержащим шламом с подогревом (не менее 1,6 м³ биогаза на 1кг сухого вещества).

4. Метод получения биоминерального удобрения и биогаза с предварительной обработкой сброживаемой смеси кальцийсодержащим шламом и диспергирования без подогрева является значительно лучшим (до 1,2 м³ биогаза на 1кг сухого вещества), чем классический метод (0,35 м³/кг).

5. Рекомендовано для экономии электроэнергии использование метода получения биоминерального удобрения и биогаза с предварительной обработкой смеси кальцийсодержащим шламом и диспергированием без подогрева в период с мая по сентябрь.

Список литературы / References

1. Огурцов А.П. Сучасне довкілля та шляхи його покращання / А.П. Огурцов, М.Д. Волошин – К.: НМЦ ВО, 2003. – 547 с.

Ogurtsov, A.P., (2003), *Suchasne dovkillia ta shliakhy ioho pokrashchennia* [Modern Environment and Ways of Its Improvement], NMTs VO, Kyiv, Ukraine.

2. Пат. 2399641 Рос. Федерация: МПК С09F3/00. Способ утилизации птичьего помета / Запева-лов М.В., Маринин С.П.; заявитель и патентообладатель Федеральное гос. образоват. учрежд. высш. проф. образования Челяб. Гос. агроинженерн. унив. – № 2009108613/12; заявл.: 10.03.2009; опубли.: 20.09.2010; Бюл. № 23.

www.fips.ru (2009), *Method of disposal of poultry manure*. Available at: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=D6A19TTW2UK1VTYYI IAK&GotoDoc=1&Query=1>, [Accessed: 20 Sept 2010].

3. Иванченко А.В. Получение органоминеральных удобрений из продуктов очистки городских сточных вод от фосфатов: автореф. дис. на соискание ученой степ. канд. техн. наук: спец. 05.17.01 / Иванченко А.В. // УГХТУ. – Днепропетровск, 2010. – 20 с.

Ivanchenko, A.V. (2010), "Preparation of organic fertilizers from the products of municipal wastewater from phosphate", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation,

specialty 05.17.01, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.

4. Пат. 2473526 Рос. Федерация: МПК С05F3/06. Установка для переработки органических отходов растительного и животного происхождения / Ковалев Д.А., Камайданов Е.Н.; заявитель и патентообладатель Рос. акад. сельскохоз. наук гос. науч. учрежд. всерос. научн.-исслед. инст. электрификации сельск. хоз. Россельхозакадемии – № 2010153655/13; заявл.: 28.12.2010; опубли.: 27.01.2013; Бюл. № 26.

www.fips.ru (2010), *Installation for processing organic waste of vegetable or animal origin*. Available at: <http://www.fips.ru/cdfi/Fips2009.dll/CurrDoc?SessionKey=D6A19TTW2UK1VTYYI IAK&GotoDoc=1&Query=2> [Accessed: 27 Jan 2013].

5. Пат. 93789 Укр.: МПК С02F 11/04, С05F 3/00, С05F 7/00, С05F 9/00, С12М 1/00, С12Р 5/00. Способ производства биогаза и органических удобрений при сброживании многокомпонентного субстрата / Мельничук М.Д., Бауэр Ф., Дубровин В.О., Дубровина О.В.; заявитель и патентообладатель Мельничук М.Д., Бауэр Ф., Дубровин В.О., Дубровина О.В. – № а200911811; заявл.: 19.11.2009; опубли.: 10.03.2011; Бюл. № 5.

base.uipv.org (2009), *A method of producing biogas and organic fertilizer during the fermentation of a multi-component substrate*. Available at: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=156165> [Accessed: 10 Mar 2011].

6. Плахотник О.М. Технология органоминеральных удобрений из осадков городских сточных вод: автореф. дис. на соискание ученой степ. канд. техн. наук: спец. 05.17.01 / Плахотник О.М. // УГХТУ. – Днепропетровск, 2006. – 20 с.

Plakhotnik, O.M. (2006), "Technology organic fertilizers from sediments of urban wastewater", Abstract of Cand. Sci. (Tech.) dissertation, specialty 05.17.01, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipropetrovsk, Ukraine.

7. Дарулис П.В. Отходы областного города. Сбор и утилизация / Дарулис П.В. – Смоленск: Смолен. концерн „Вторич. ресурсы“, 2000. – 520 с.

Darulis, P.V. (2000), *Otkhody oblastnogo goroda. Sbor i utilizatsya* [Wastes From the Regional City. Collection and Disposal], Smolensky Concern "Vtorichnye Resursy", Smolensk, Russia.

8. Энерготехнологія отримання органо-мінеральних добрив з осадів стічних вод, курячого посліду та шламу хімоводопідготовки / О. Очеретнюк, М. Волошин, А. Иванченко, Н. Макаренко // Вісник Національного технічного університету „Харківського політехнічного інституту“. – 2011. – № 31. – С. 104–114.

Ocheretniyuk, O., Voloshyn, M., Ivanchenko, A. and Makarchenko, N. (2011), *Energetic technology of production of organic fertilizers from sewage sludge, chicken manure and chemical water treatment sludge, chicken manure and chemical water treatment sludge. Proceedings of the National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"*, no. 31, pp. 104–114.

9. Пат. 70314 Укр.: МПК C05F 3/00. Способ получения органо-минерального удобрения из птичьего помета. / Очеретнюк А.Р., Иванченко А.В., Волошин Н.Д. – № u201112820; заявл.: 01.11.2011; опубл.: 11.06.2012; Бюл. № 11.

base.uipv.org (2011), *A process for preparing organic-mineral fertilizer from bird droppings*. Available at: <http://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=173767> [Accessed: 11 Jun 2012].

10. Дорохов И.Н. Системный анализ процессов химической технологии. Интеллектуальные системы и инженерное творчество в задачах интенсификации химико-технологических процессов и производств / И.Н. Дорохов, В.В. Меньшиков. – М.: Наука, 2005. – 583 с.

Dorokhov, I.N. and Menshikov, V.V. (2005), *Sistemnyy analiz protsessov i tekhnologii. Intellektualnye sistemy i inzhenernoye tvorchestvo v zadachakh intensifikatsii khimiko-tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv* [Systems analysis of chemical processes. Intelligent Systems and Engineering Creativity in the Problems of the Intensification of Chemical Processes and Production], Nauka, Moscow, Russia.

Мета. Дослідження впливу попередньої хімічної та механічної обробки анаеробно зброджувальної суміші із вторинної сировини на динаміку й швидкість виходу біогазу методом регресійного аналізу та лабораторних досліджень. Визначення впливу факторів, що впливають на якість процесу анаеробного зброджування, зокрема динаміку та швидкість виходу біогазу за отриманими результатами.

Методика. Методом анаеробного зброджування біомінеральної суміші, що складалася з курячого посліду, ущільненого активного мулу, фосфоровмісного осаду стічних вод, отримано екологічно чисте біомінеральне добриво. Досліджували вплив попередньої обробки біомінеральної суміші кальційвмісними шламами та диспергуванням на інтенсивність процесів анаеробного бродіння, вихід біогазу з отриманням біомінерального добрива.

Результати. Розроблено математичні моделі процесів анаеробного бродіння біомінеральної суміші, доведена їх адекватність експериментальним даним. Встановлено, що найбільш ефективним способом оптимізації технології одержання біомінерального добрива є метод попередньої обробки кальційвмісними шламами з диспергуванням та наступним підігрівом суміші. Йому майже не поступається метод попередньої обробки кальційвмісними шламами з підігрівом біомінеральної суміші. Менш ефективним методом оптимізації процесу отримання біомінерального добрива є метод попередньої обробки кальційвмісними шламами з диспергуванням без подальшого підігріву суміші. У порівнянні з класичним методом анаеробного бродіння без попередньої обробки зброджувальної суміші, метод попередньої обробки кальційвмісними шламами з диспергуванням без подальшого підігріву суміші ефективніший та його можна застосовувати в період з травня по вересень, що дозволить економити електроенергію.

Наукова новизна. Методом регресійного аналізу встановлено вплив попередньої обробки кальційвмісними шламами із диспергуванням та подальшим підігрівом біомінеральної суміші на швидкість і динаміку виходу біогазу.

Практична значимість. Математичні залежності процесів одержання біомінерального добрива шляхом анаеробного бродіння біомінеральної суміші з попередньою обробкою кальційвмісними шламами, диспергуванням, наступним підігрівом суміші можуть використовуватися для розрахунків оптимальних методів при виборі способів попередньої обробки зброджувальної суміші у промисловості. Встановлений позитивний вплив методу попередньої обробки кальційвмісними шламами та диспергування без подальшого підігріву на швидкість і динаміку виходу біогазу, що дозволяє у промислових умовах знизити витрати електроенергії в період з травня по вересень.

Ключові слова: анаеробне бродіння, біомінеральна суміш, диспергування, кальційвмісні шлами

Purpose. To study the effect of preliminary chemical and mechanical treatment of anaerobically fermented recycled material mixture on the dynamics and speed of biogas discharge by the method of regression analysis and laboratory studies. To determine the impact of factors affecting the quality of the process of anaerobic digestion, in particular the dynamics and speed of biogas discharge, based on the results received.

Methodology. We have applied the method of anaerobic digestion of biomineral mixture to produce environmentally safe biomineral fertilizers from the mixture of chicken manure, compacted sludge, and phosphorus sewage sludge. We have studied the effect of pre-treatment of biomineral mixture by calcium-containing sludge and dispersing on the intensity of anaerobic fermentation processes, biogas discharge to produce biomineral fertilizer.

Findings. The mathematical models of the processes of anaerobic fermentation of biomineral mixture have been developed; their relevance has been proved by experimental data. We have found out that the most effective way to optimize the biomineral fertilizer production technology is the method of pre-treatment by calcium-containing sludge and dispersion with further heating. The method of pre-treatment by calcium-containing sludge with biomineral mixture heating is almost as effective as the first one. The method of pre-treatment by calcium-containing sludge and dispersing without further mixture heating is less effective, but in comparison with the classical method (without pre-treatment), it can be applied in the period from May to September, which will save energy.

Originality. Using regression analysis method we have studied the influence of pre-treatment by calcium-containing sludge, dispersing, and following heating of the biomineral mixture on the speed and dynamics of biogas discharge.

Practical value. The mathematical correlations of biomineral fertilizer production through anaerobic fermentation of biomineral mixture and its pre-treatment by calcium-containing sludge, dispersion followed by mixture heating, can be used to calculate the optimal methods of fermenta-

tion mixture pre-treatment in the industry. The positive effect of pre-treatment by calcium-containing sludge and dispersing without further heating on the speed and dynamics of biogas discharge has been discovered. Its implementation allows reducing power consumption of industrial production process during the period from May to September.

Keywords: *anaerobic fermentation, biomineral mixture, dispersion, calcium-containing sludge*

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук О.В. Зберовським. Дата надходження рукопису 02.04.13.

УДК 614.89

С.І. Чеберячко, канд. техн. наук, доц.

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна, e-mail: sihc@yandex.ru

ДОСЛІДЖЕННЯ ОПОРУ ДИХАННЮ ФІЛЬТРУВАЛЬНОГО РЕСПІРАТОРА НА ЦИКЛІЧНОМУ ПОТОЦІ ПОВІТРЯ

S.I. Cheberiachko, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: sihc@yandex.ru

THE STUDY OF THE FILTERING RESPIRATOR BREATHING RESISTANCE UNDER CYCLIC CURRENT OF AIR

Мета. Визначення теоретичної залежності для розрахунку перепаду тиску фільтрувальних одноразових протипилових респіраторів на пульсуючому потоці для встановлення основних параметрів, що впливають на ергономічні й захисні показники засобів індивідуального захисту органів дихання (ЗІЗОД).

Методика. До процесу дослідження ламінарного руху повітря в пористому середовищі використовувалися спрощені рівняння Нав'є-Стокса у формі Ейлера з урахуванням фіктивних масових сил опору Жуковського.

Результати. Розглянута теорія проходження циклічного ламінарного повітряного потоку через пористий матеріал на основі рівняння Нав'є-Стокса. Визначена залежність перепаду тиску на ЗІЗОД від циклічного руху повітря з урахуванням об'єму та частоти дихання людини, параметрів фільтру – коефіцієнта проникнення та пористості фільтрувального шару. Доведено, що зростання витрати повітря через півмаску призводить до нерівномірного повітряного навантаження на окремих її ділянках, що збільшує перепад тиску на респіраторі. Визначені основні параметри, якими можна зменшити опір диханню ЗІЗОД. Встановлена залежність між коефіцієнтом проникнення та пористістю фільтрувального шару, що дозволяє забезпечити максимальну захисну ефективність респіратора за рахунок рівномірного розподілу швидкості фільтрування за висотою одноразової півмаски при різній частоті дихання.

Наукова новизна. Досягнення рівномірного розподілу швидкості фільтрування за висотою одноразової фільтрувальної півмаски при збільшенні витрати повітря можливе за рахунок зменшення пористості фільтрувального шару при забезпеченні мінімального коефіцієнта проникнення респіратора.

Практична значимість. Визначені оптимальні показники пористості фільтрувального шару для забезпечення мінімального перепаду тиску для протипилового респіратора Лепесток.

Ключеві слова: *протипиловий респіратор, перепад тиску, опір диханню, частота дихання, глибина дихання, навантаження*

Постановка проблеми. Опір респіратора є важливою ергономічною характеристикою, від якої залежать додаткові затрати енергії організму людини при виконанні виробничих завдань. Для підтримки максимальної працездатності людини, яка користується протипиловим респіратором, на всьому проміжку робочої зміни, необхідно забезпечувати мінімальний додатковий опір диханню.

Величина опору повітряному потоку фільтрів залежить від режиму дихання та характеристик фільтрувального матеріалу: діаметру волокна, щільності упакування волокон, товщини фільтрувального шару.

На сьогодні відомі теоретичні залежності, що дозволяють визначити перепад тиску на протипилових респіраторах на постійному потоці повітря [1, 2]. Однак, процес дихання – це переміщення деякого об'єму повітря з атмосфери до легенів, а потім у зворотному напрямі. У першому наближенні можна вважати, що він здійснюється за законом гармонійних коливань. Ураховуючи те, що збільшення швидкості повітряного потоку може призвести до погіршення як ергономічних та і захисних властивостей засобів індивідуального захисту органів дихання, дослідження впливу на них циклічного потоку є актуальною задачею, вирішення якої дозволить покращити якість індивідуальних захисних засобів.