УДК 66.081.63:631.862.2

МЕМБРАННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОДГОТОВКИ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ СТОКОВ ДЛЯ ИХ УТИЛИЗАЦИИ В ОРОШАЕМОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ

MEMBRANE TECHNOLOGY TRAINING FOR ANIMAL WASTE DISPOSAL IN IRRIGATED AGRICULTURE

М.И. Филимонов^{1,2},
А.Е. Новиков^{1,2}, доктор технических наук, доцент,
А.Б. Голованчиков², доктор технических наук, профессор,
Т.Г. Константинова¹

M.I. Filimonov^{1,2},
A.E. Novikov^{1,2}, doctor of technical sciences, associate professor,
A.B. Golovanchikov², doctor of technical sciences, professor,
T.G. Konstantinova¹

¹Всероссийский научно-исследовательский институт
орошаемого земледелия,

¹The All-Russian Research Institute of Irrigated Agriculture,
²Volgograd State Technical University

²Волгоградский государственный технический университет

На животноводческих фермах за сутки может скапливаться до 3 000 м³ навозных стоков. После глубокой их обработки эти стоки могут использоваться на сельскохозяйственных полях орошения в качестве удобрительного полива, так как содержат растворенные минеральные элементы, необходимые для питания сельскохозяйственных культур. При отсутствии специальной обработки навозные стоки представляют опасный источник патогенных микроорганизмов и диффузного загрязнения водосборных бассейнов экосистем. Ресурсоэффективная и экологичная обработка навозных стоков достигается технологией, включающей их последовательное разделение на твердую и жидкую фазы в осадительной центрифуге со шнековой выгрузкой осадка и дегельминтизацию жидкой фазы на установке ультрафильтрации. По результатам математического моделирования процесса разделения твердой и жидкой фаз установлено, что все центрифуги при заданном фракционном составе навозных стоков обеспечивают 97%-ную степень очистки, однако с позиции энергоэффективности наиболее целесообразно проводить процесс в машине типа ОГШ-202К-03 с мощностью привода 5,5 кВт и фактором разделения 3 015. В результате расчета процесса ультрафильтрации жидкой фазы установлено, что все типы мембран обеспечивают конечную концентрацию отделяемого компонента в пермеате на уровне 0,05% (масс.), однако с позиции материалоемкости необходимо использовать мембрану типа МФАС-П-3 с площадью перегородки 3,4 м².

Livestock farms can accumulate up to 3 000 m³ of manure per day. After deep processing, these effluents can be used in agricultural irrigation fields as fertilizer irrigation, as they contain dissolved mineral elements necessary for feeding crops. In the absence of special treatment, manure runoff is a dangerous source of pathogenic microorganisms and diffuse pollution of ecosystem catchments. Resource-efficient and environmentally friendly treatment of manure effluents is achieved by technology that includes their sequential separation into solid and liquid phases in a sedimentary centrifuge with auger sludge unloading and deworming of the liquid phase at the ultrafiltration unit. According to the results of mathematical modeling of the process of separation of solid and liquid phases, it was found that all centrifuges with a given fractional composition of manure effluents provide 97% degree of purification, but from the standpoint of energy efficiency it is most advisable to carry out the process in a machine of the type OGS-202K-03 with a drive power of 5.5 kW and a separation factor of 3 015. As a result of calculating the process of ultrafiltration of the liquid phase, it was found that all types of membranes provide the final concentration of the separated component in the permeate at the level of 0.05% (mass.), however, from the position of material capacity it is necessary to use a membrane type MFAS-P-3 with a partition area of 3.4 m².

Ключевые слова: животноводческие стоки, обработка, центрифугирование, мембранное разделение, моделирование, патогенные микроорганизмы, сельскохозяйственные поля орошения, ресурсоэффективные машинные технологии

Keywords: livestock runoff, processing, centrifugation, membrane separation, modeling, pathogenic microorganism, agricultural irrigation fields, resource efficient machine technologies

Введение. На фермах Волгоградской области преобладает бесподстилочное содержание сельскохозяйственных животных, которое обуславливает необходимость ежедневного удаления продуктов их жизнедеятельности. Существующие животноводческие фермы отдают предпочтение гидросмывным системам периодического действия,

поскольку применение направленных водяных струй обеспечивает высокую эффективность удаления экскрементов. Однако качественное удаление навоза из зоны содержания животных возможно лишь при строгом соблюдении нормы расхода смывной воды, которая составляет от 20 до 30 л/сутки на одно сельскохозяйственное животное. Таким

образом, на стандартных животноводческих фермах (на 10 000 голов) может скапливаться до 3 000 м³ навозных стоков в сутки, которые необходимо утилизировать [4].

Ресурсоэффективное решение этой экологической проблемы возможно путем использования животноводческих стоков на сельскохозяйственных полях оро-

шения (ЗПО). Однако без специальной обработки стоки представляют опасный источник патогенных микроорганизмов и диффузного загрязнения водосборных бассейнов экосистем. Обработка стоков – это многостадийный процесс, включающий санитарный смыв продуктов жизнедеятельности сельскохозяйственных животных в отводные каналы, последующее разделение и фильтрацию стоков с помощью динамических виброфильтров на твердую и жидкую фазы, сушку и дегельминтизацию твердой фазы, механическую и биологическую очистку жидкой фазы. Только после такого комплекса экологических мероприятий твердая фаза может использоваться в качестве удобрения, а жидкая фаза для полива кормовых и технических культур [4].

Анализ существующих исследований в данном направлении указывает на целесообразность использования центрифуг для отделения твердой фазы от жидкой [1, 6]. Однако отсутствие достоверной методики подбора типа-размера центрифуг выступает сдерживающим фактором широкого применения центробежных роторных машин для разделения навозных стоков на компоненты. Кроме того, процесс центрифугирования не позволяет проводить очистку жидкой фазы, заключающийся в дегельминтизации патогенных микроорганизмов. При этом имеется положительный опыт использования мембранных технологий в регулировании качества поливной воды [2].

Таким образом, цель настоящего исследования заключалась в разработке

ресурсоэффективной и экологичной технологии обработки навозных стоков животноводческих ферм и дегельминтизации жидкой фазы для последующей ее утилизации на ЗПО.

Материалы и методы. Идентификацию показателей эффективности работы различных типов центрифуг и мембран установки ультрафильтрации, а также параметров их конструкции проводили методом математического моделирования в программе MS Excel.

Сушку твердой фазы (после отделения жидкой фазы) проводили при температуре 75-90°C под вакуумом в сушильном шкафу ВШ-0,035М при непрерывном определении массы образца. Сушку прекращали, когда два последовательных взвешивания образца показывали одинаковые или близкие результаты. Для определения массы образца использовали лабораторные весы ВК1500.1.

Поврежденный состав (дисперсность) твердой фазы определяли ситовым методом. Для этого образец массой 500 грамм пропускали через набор сит, установленных одно над другим в порядке убывания размеров отверстий сверху вниз на вибростол. Взвешивая каждую фракцию, полученную таким образом, определяли ее массу (m_i , кг) и процентное содержание (y , %) этой фракции по отношению к массе исходного образца (M , кг).

Для получения достоверных результатов все опыты проводили в четырехкратной повторности.

Результаты и обсуждение. Рассматривая процесс центрифугирования применительно к обработке навозных стоков, необходимо подбирать такую машину, которая бы обеспечивала автоматическую выгрузку твердой фазы с влажностью не более 25-30% [4]. Этому требованию удовлетворяют центрифуги марки ОГШ со шнековой выгрузкой осадка, причем эффективность разделения суспензий в этих машинах может достигать 95-98% [5].

При бесподстильном содержании животных навозные стоки, например, свиноводческих ферм представляют собой 10%-ную суспензию, из которых 97% – песок, ил, остатки кормов и твердых экскрементов, а 3% – патогенные микроорганизмы (бактерии и яйца гельминтов) [4].

Значения режимных параметров различных типов осадительных центрифуг, в том числе интегральной степени очистки и номинального диаметра уловленных частиц твердой фазы из расчета производительности по навозному стоку на 100 голов свиней представлены в таблице 1.

Полученные результаты математического моделирования показали, что все рассматриваемые центрифуги при заданной производительности по навозному стоку теоретически обеспечивают 97%-ную степень очистки, что соответствует содержанию твердой фазы в навозном стоке. Однако, учитывая па-

Таблица 1 – Исходные, справочные и расчетные значения параметров осадительных центрифуг для разделения навозных стоков на твердую и жидкую фазы

Параметр	Размер- ность	Обоз- начение	Величина				
Исходные данные							
Производительность	м³/с	qv	1,05·10-3				
Плотность твердой фазы	кг/м³	ρт	1 400				
Плотность жидкой фазы	кг/м³	ρж	1 085				
Вязкость жидкой фазы	Па·с	μж	0,0025				
Начальная концентрация твер- дой фазы	% масс.	хн	10				
Дисперсность твердой фазы	%	с(i)	3	15	58	12	9
Диаметр фракций	мкм	d(i)	50	75	125	250	375
Справочные данные							
Тип центрифуги	-	-	*	**	***	****	
Внутренний диаметр ротора	м	D	0,2	0,32	0,5	0,63	
Внутренний радиус кольцевого слоя жидкости	м	RB	0,05	0,11	0,2	0,265	
Длина ротора	м	L	0,6	0,576	0,93	2,34	
Мощность привода	кВт	N	5,5	11	30	90	
Частота вращения	об/мин	ω	6 000	4 000	2 800	2 000	
Расчетные данные							
Интегральная степень очистки	%	η	97	97	97	97	
Номинальный диаметр частиц, уловленных на 100%	мкм	d0	19	13	9,2	7,5	
Фактор разделения	–	Fr	3 015	2 412	1 969	1 293	
Критерий Рейнольдса	–	Reж	2 190	1 465	1 900	1 770	

Примечание: * – ОГШ-202К-03, ** – ОГШ-321К-01, *** – ОГШ-501К-06, **** – ОГШ-631К-02

Таблица 2 – Концентрация и размер патогенных микроорганизмов в навозных стоках [5]

Наименование	Энтерококки	Стафилококки	Клостридии	Яйца гельминтов
Содержание, шт./л	0,2·10 ⁶	10 ¹⁰ -10 ¹²	180-4·10 ⁴	158-427
Размер, мкм	0,6-2,5	0,6-1,2	0,3-20,0	11-26

Таблица 3 – Исходные, справочные и расчетные значения параметров ультрафильтрационной установки для дегельминтизации жидкой фазы

Параметр	Размерность	Обозначение	Величина			
Исходные данные						
Производительность	кг/с	qv	1,05·10-3			
Номинальный диаметр отделяемого компонента	мкм	d0	0,3			
Коэффициент диффузии отделяемого компонента	м²/с	Dж	7·10-11			
Начальная концентрация отделяемого компонента в исходном растворе	% масс.	xн	3			
Конечная концентрация отделяемого компонента в ретанте	% масс.	xk	15			
Требуемая концентрация отделяемого компонента в пермеате на выходе	% масс.	xр	0,01			
Плотность жидкой фазы	кг/м³	ρж	1 085			
Вязкость жидкой фазы	м²/с	μж	2,1·10-6			
Вязкость чистой воды	Па·с	μ0	1 004·10-6			
Справочные данные						
Тип мембраны	-	-	*	**	***	****
Средний диаметр пор	мкм	dcp	0,2-0,5	0,85-1,5	0,2	0,3
Производительность мембраны по воде при давлении р0 = 0,05 МПа	мл/(см²·мин)	q0	6,1-26	85-180	6-10	14-20
Рабочее давление мембраны	МПа	р	0,5	0,2	0,5	0,5
Проницаемость мембраны	%	f	95	95	90	97
Расчетные данные						
Конечная концентрация отделяемого компонента в пермеате	%, масс.	хкр	0,05	0,055	0,05	0,05
Расход пермеата	кг/с	Lp	5,4·10-4	5,4·10-4	5,51·10-4	5,35·10-4
Расход ретанта	кг/с	Lk	5,1·10-4	5,1·10-4	4,99·10-4	5,15·10-4
Поверхность мембраны	м²	F	15,69	3,4	17,4	15,2

Примечание: * – МФАС-П-2, ** – МФАС-П-3, *** – МФАС-Б-4, **** – МФАС-МА-6

Рисунок 1 – Схема обработки навозных стоков

раметры энергопотребления машины, наиболее целесообразным будет применение центрифуги типа ОГШ-202К-03 с мощностью привода 5,5 кВт.

Особую опасность при использовании навозных стоков на орошении представляют патогенные микроорганизмы, которые при попадании в организмы людей и животных, выделяя токсины, поражают внутренние органы, вызывают отравление и развитие гнойно-воспалительных процессов [4] (таблица 2).

Эффективное удаление бактерий и яиц гельминтов возможно путем применения мембранной технологии на ультрафильтрационных установках. В соответствии с данными таблицы 2 наименьший размер микроорганизмов составляет 0,3 мкм, в связи с этим для обеспечения полного их удаления необходимо подобрать мембрану с размером пор, близким к размеру микроорганизмов.

Используя каталожные данные существующих на отечественном рынке мембран [3], были рассчитаны их требуемые поверхности (таблица 3). В ходе проведения исследований рассматриваемые мембраны обеспечивали высокую степень концентрирования – доля проскочивших

микроорганизмов варьировала от 0,05 до 0,055%. Однако, учитывая параметры материалоемкости установки, наиболее целесообразно применять мембрану типа МФАС-П-3 с требуемой площадью перегородки 3,4 м². Данная поверхность формируется за счет скручивания полупроницаемой перегородки в рулон, высота которого составляет 1,9 м.

На рисунке 1 показана схема обработки навозных стоков с учетом выполненных исследований. При санитарном обслуживании фермы продукты жизнедеятельности сельскохозяйственных животных (I) смываются через отводные каналы в накопитель навозных стоков (1), откуда дренажным насосом (2) они подаются в осадительную центрифугу со шнековой выгрузкой осадка (3). Основным рабочим органом центрифуги служит горизонтально расположенный ротор, внутри которого концентрич-

но закреплен шнек. Вращение ротора и шнека организовано в одном направлении, при этом угловая скорость шнека ниже скорости ротора. В результате разности скоростей осуществляется разделение навозных стоков на твердую и жидкую фазы, транспортировка твердой фазы вдоль стенки ротора к разгрузочным окнам и далее на компостирование (III). Жидкая фаза (II) с помощью насоса (4) перекачивается на ультрафильтрационную установку (5), где производится ее дегельминтизация, а далее в пруд-накопитель (6). Из него вода с растворенными элементами питания (V) посредством погружного насоса (7) подается в систему орошения (VI) для полива сельскохозяйственных культур. В ходе мембранного разделения, кроме очищенной жидкости, образуется биоорганический концентрат (пермеат) (IV), подлежащий утилизации.

Заключение. Анализ полученных данных по результатам математического моделирования подтверждает целесообразность использования центрифуг и мембранных технологий для разделения навозных стоков и дегельминтизации жидкой фазы для последующего ее использования на сельскохозяйственных полях орошения.

Библиографический список

1. Киров, Ю.А. Повышение эффективности процесса разделения навозных стоков свиноводческих ферм и комплексов на фракции совершенствованием способов и технических средств [Текст]: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.01 / Киров Юрий Александрович. – Саратов, 2013. – 42 с.
2. Максименко, В.П. Регулирование качества поливной воды на оросительных системах [Текст] / В.П. Максименко, С.А. Зайцев // Природообустройство. – 2011. – №5. – С. 15-20.
3. Микрофильтрационные мембраны типа МФАС-М [Эл. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.vladipor.ru/catalog/&cid=001> (дата обращения 25.01.2019).
4. РД-АПК 1.10.15.02-17. Методические рекомендации по технологическому проектированию систем удаления и подготовки к использованию навоза и помета [Текст]. – Взамен РД-АПК 1.10.15.02-08; утв. и введ. 23.05.2017. – Москва, 2017. – 167 с.
5. Машины и аппараты химических производств и нефтегазопереработки [Текст]: учебник для вузов / А.С. Тимонин, Г.В. Божко, В.Я. Борщев [и др.]; под общ. ред. А.С. Тимониной. – Калуга: Изд-во «Ноосфера», 2017. – 948 с.
6. Физическое и математическое моделирование процессов центрифугирования [Текст]: монография / А.Б. Голованчиков, А.Е. Новиков, М.И. Филимонов, М.К. Доан; ВолгГТУ. Волгоград, 2018. – 157 с.

Дополнительные сведения об авторах:

Максим Игоревич Филимонов, младший научный сотрудник отдела оросительных мелиораций¹, старший преподаватель кафедры процессы и аппараты химических и пищевых производств², maks.filimonov.1986@mail.ru,

Андрей Евгеньевич Новиков, старший научный сотрудник отдела оросительных мелиораций¹, заведующий кафедрой процессы и аппараты химических и пищевых производств², ae_novikov@mail.ru,

Александр Борисович Голованчиков, профессор кафедры процессы и аппараты химических и пищевых производств², pahp@vstu.ru,

Татьяна Геннадьевна Константинова, старший научный сотрудник отдела оросительных мелиораций¹, tg.konstantinova.55@mail.ru

Bibliographic list

1. Kirov, Yu.A. improving the efficiency of the separation process manure of a pig-breeding farms and complexes into fractions improvement of the processes and technical tools [Text]: author. dis. ... d-ra tekhn. Sciences: 05.20.01 / Yuri Alexandrovich Kirov. – Saratov, 2013. – 42 p.
2. Maximenko, V.P. Regulation of irrigation water quality on irrigation systems [Text] / V.P. Maksimenko, S.A. Zaytsev // Nature Management. – 2011. – №5. – P. 15-20.
3. Microfiltration membrane of the type MFAS-M [e. resource.] – Mode of access: <http://www.vladipor.ru/catalog/&cid=001> (accessed 25.01.2019).
4. RD-APK 1.10.15.02-17. Guidelines for technological design of systems for removal and preparation for use of manure and litter [Text]. – Instead of RD-APK 1.10.15.02-08; app. and enter. 23.05.2017. – Moscow, 2017. – 167 p.
5. Machines and apparatus of chemical production and oil and gas processing [Text]: textbook for universities / A.S. Timonin, G.V. Bozhko, V.J. Borsch [and others]; under the General editorship of S.A. Timonina. – Kaluga: Publishing house «Noosphere», 2017. – 948 p.
6. Physical and mathematical modeling of the processes of centrifugation [Text]: monograph / A.B. Golovanchikov, A.E. Novikov, M.I. Filimonov, M.K. Doane; VSTU. Volgograd, 2018. – 157 p.

Additional information about the authors:

Maxim Igorevich Filimonov, junior researcher of the department of irrigation and reclamation¹, senior lecturer of the department processes and devices of chemical and food industry², maks.filimonov.1986@mail.ru,

Andrey Evgenievich Novikov, senior researcher of the department of irrigation and reclamation¹, head of the department processes and apparatus of chemical and food production², ae_novikov@mail.ru,

Alexander Borisovich Golovanchikov, professor of the department processes and apparatus of chemical and food industries², pahp@vstu.ru,

Tatyana Gennad'evna Konstantinova, senior researcher of the department of irrigation and reclamation¹, tg.konstantinova.55@mail.ru