

УДК 628.32

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ АНАЭРОБНО-АЭРОБНОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД МОЛОКОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© 2022 Х.Т. Ле^{1,2}, Р.Э. Хабибуллин¹, А.М. Петров³

¹ Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

² Индустриальный университет Вьет Чи, Вьетнам

³ Институт проблем экологии и недропользования Академии наук Республики Татарстан,
г. Казань, Россия

Статья поступила в редакцию 11.02.2022

В статье приводятся результаты расчетов экологической эффективности внедрения разработанной биотехнологии анаэробно-аэробной очистки сточных вод для действующего на территории Республики Татарстан молокоперерабатывающего предприятия. При очистке по разработанной технологии образующихся на предприятии сточных вод в объеме 200 м³/сут годовой экономический эффект составит 147208,80 руб. Представлены результаты расчета энергетической эффективности функционирования установки анаэробно-аэробной очистки сточных вод с получением возобновляемого климатически нейтрального источника энергии – биогаза.

Ключевые слова: Сточные воды, молочная промышленность, анаэробно-аэробная очистка сточных вод, биогаз, экономическая и экологическая эффективность.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-6-160-164

ВВЕДЕНИЕ

Молочная промышленность широко развита во всем мире и обеспечивает производство множества пищевых продуктов (молоко, сухое молоко, масло, сыр и др.). При этом образуются достаточно большие объемы твердых и жидких отходов [1, 2], в связи с чем переработка молока является одним из главных источников концентрированных сложных по составу сточных вод [3], что обусловлено высоким показателем водопотребления предприятий, высокой биологической и химической потребностью сточных вод в кислороде, большим содержанием белков, жиров, лактозы, а также детергентов и дезинфицирующих средств. Без правильно организованной очистки такие воды могут вызвать серьезные экологические проблемы при поступлении в окружающую среду [4, 5].

В настоящее время среди регионов России Приволжский федеральный округ является лидером по производству молока. На его долю приходится практически треть от всего объема производимого в России сырья – около 9,5 млн. тонн. Республика Татарстан – крупнейший производитель сырого молока в России, в 2019 году

объем производства молока в регионе достиг 1350 тыс. тонн (+ 4,2% к 2018 году), при этом объем переработки молока вырос на 11,6% до 1010 тыс. тонн. В ТОП-100 молокоперерабатывающих заводов РФ вошло восемь из 38 предприятий из Татарстана, которые переработали 661,9 тыс. тонн молока, что составляет 65,53% от объема переработки молока в РФ, или 3,34% объема переработки в РФ [6].

Реализуемая в настоящее время в России Федеральная программа «Оздоровление Волги» национального проекта «Экология» предусматривает сокращение ежегодного сброса неочищенных сточных вод в реку Волга на 2,8 км³, что требует строительства новых и реконструкции действующих очистных сооружений (Федеральный проект «Оздоровление Волги» разработан в рамках национального проекта «Экология» в соответствии с Указом Президента Российской Федерации от 7 мая 2018 г. № 204 «О национальных целях и стратегических задачах развития Российской Федерации на период до 2024 года»). Высокая опасность для водных биоценозов реки Волги и ее притоков сброса не очищенных и недостаточно очищенных сточных вод молокоперерабатывающих предприятий повышает актуальность разработки технологий их очистки, в том числе и в Республике Татарстан.

Известно, что в аэробных условиях достаточно сложно добиться высокой эффективности очистки сточных вод молокоперерабатывающих производств. Их эффективная очистка требует использования методов, обеспечивающих удаление или предварительную трансформацию

Ле Хыонг Тхао, аспирант кафедры технологии молочных и мясных продуктов. E-mail: lehu-ongthao2706@gmail.com
Хабибуллин Рустем Эдуардович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии молочных и мясных продуктов. E-mail: hrustik@yandex.ru
Петров Андрей Михайлович, кандидат биологических наук, заведующий лабораторией экологических биотехнологий. E-mail: zpat2@yandex.ru

присутствующих в них органических веществ. В ранее опубликованных работах показано, что анаэробные процессы являются предпочтительными методами переработки органических отходов и очистки сточных вод пищевых предприятий по сравнению с аэробными [7-12].

Однако любая разработанная биотехнология очистки сточных вод требует оценки экологической эффективности от внедрения, для чего должны быть проведены расчеты предотвратимого экологического ущерба.

С этой целью в данной статье мы проводим оценку экологической эффективности внедрения разработанной биотехнологии анаэробно-аэробной очистки сточных вод действующего в Республике Татарстан молокоперерабатывающего предприятия.

Кроме того, представлены результаты расчета энергетической эффективности функционирования установки анаэробно-аэробной очистки сточных вод с получением климатически нейтрального топлива – биогаза.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Предотвращенный экологический ущерб от загрязнения окружающей среды представляет собой оценку в денежной форме возможных отрицательных последствий загрязнения природной среды, которые удалось избежать или минимизировать в результате осуществления природоохранных мероприятий на проектируемом объекте.

Оценка величины предотвращенного ущерба от загрязнений водной среды проводилась на основе показателей удельного ущерба, представляющих собой удельные стоимостные оценки ущерба на единицу (1 условную тонну) приведенной массы загрязняющих веществ [13-15].

Согласно этой методике расчета общая величина ущерба от загрязнения водоема определяется в соответствии с выражением [13]:

$$Y = \gamma \cdot \sigma_k \cdot M, \quad (1)$$

где Y – ущерб, наносимый окружающей среде сбросами в водоемы вредных веществ, руб./год;

γ – удельный ущерб, причиняемый народному хозяйству сбросом в водоемы одной условной тонны загрязняющих веществ, $\gamma = 4000$ руб./усл.т;

σ_k – показатель относительной опасности загрязнения водоема или его участка. Для водохозяйственных участков Татарстана значения константы $\sigma_k = 0,5$.

M – приведенная масса сбрасываемых в водоемы веществ (усл.т/год).

Приведенная годовая масса загрязняющих веществ может быть рассчитана по формуле:

$$M = \sum A_i \cdot m_i, \quad (2)$$

где A_i – показатель относительной опасности сброса в водоем i -го вещества, усл.т/т;

m_i – масса годового сброса в водоем i -го вещества, т/год.

Значение A_i связано с величиной ПДК_{вр*i*} соотношением:

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_{\text{вр}i}}, \quad (3)$$

где ПДК_{вр*i*} – предельно допустимая концентрация i -го загрязнителя в воде рыбохозяйственных объектов, мг/л.

Количество поступающего в водохозяйственный участок i -го загрязнителя зависит от объема годового сброса сточных вод источниками загрязнения и от концентрации i -го загрязнителя в источниках загрязнения:

$$m_i = \sum c_{ij} \cdot V_{ij}, \quad (4)$$

где c_{ij} – концентрация i -го загрязнителя в j -м источнике загрязнения г/м³;

V_{ij} – годовой сброс i -го загрязнителя j -м источником загрязнения, м³/год.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

В качестве исходных были приняты характеристики реальных сточных вод действующего молокоперерабатывающего завода, параметры которых были использованы при моделировании и разработке биотехнологии очистки сточных вод. Средний суточный объем образующихся сточных вод составляет 200 м³, годовой объем промышленных стоков 71 000 м³.

Исходные данные для расчета эколого-экономического эффекта при использовании анаэробного метода очистки сточных вод представлены в таблице 1 [14-17].

Далее рассчитали показатели относительной опасности сброса, массы годового сброса в канализацию, приведенной массы годового сброса данного загрязняющего вещества и предотвращенного эколого-экономического ущерба по формулам 1-4. Результаты расчета предотвращенного эколого-экономического ущерба до и после проведения водоохранных мероприятий представлены в таблице 2 и 3.

Результаты расчета предотвращенного эколого-экономического ущерба представлены в таблице 4.

Расчет энергетического потенциала сточных вод предприятия по переработке цельного молока производился с учетом следующих исходных данных [18] для предприятия:

- средний годовой объем сточных вод предприятия = 71 тыс.м³;

- средняя загрязненность сточных вод по ХПК – 3800 г О₂/м³;

- эффективность очистки на анаэробной ступени – 90%;

Таблица 1. Исходные данные для расчета эколого-экономического эффекта

Состав сточных вод	Концентрация в сточных водах, мг/дм ³		
	до очистки $c_{i,1}$	после очистки $c_{i,2}$	ПДК _{вр i}
Взвешенные вещества	1426,00	9,0	10,0
ХПК	3799	35,0	30,0
БПК _{полн.}	2137,17	3,0	3,0
[NH ₄ ⁺]	76,15	1,5	2,0
NO ₂ ⁻	1,34	0,06	0,08
АСПАВ	0,58	<0,1	0,1

Таблица 2. Приведенные массы годового сброса до биоочистки сточных вод

Компоненты сточных вод	Показатель относительной опасности сброса A_i , усл. т/т	Масса годового сброса в канализацию $m_{i,1} = c_{i,1} \cdot V$, т/год	Приведенная масса годового сброса данного загрязняющего вещества $M_{i,1} = A_i \cdot m_{i,1}$, усл.т/год	Ущерб $У_1$, руб./год
Взвешенные вещества	0,10	101,25	10,12	20249,20
ХПК	0,03	269,73	8,99	17981,93
БПК _{полн.}	0,33	151,74	50,58	101159,38
[NH ₄ ⁺]	0,50	5,41	2,70	5406,65
NO ₂ ⁻	12,5	0,10	1,19	2378,50
АСПАВ	10	0,04	0,41	823,6
Итого $У_1$:				147999,26

Таблица 3. Приведенные массы годового сброса после биоочистки сточных вод

Компоненты сточных вод	Показатель относительной опасности сброса A_i , усл. т/т	Масса годового сброса в канализацию $m_{i,2} = c_{i,2} \cdot V$, т/год	Приведенная масса годового сброса данного загрязняющего вещества $M_{i,2} = A_i \cdot m_{i,2}$, усл.т/год	Ущерб $У_2$, руб./год
Взвешенные вещества	0,10	0,64	0,06	127,80
ХПК	0,03	2,49	0,08	165,67
БПК _{полн.}	0,33	0,21	0,07	142,00
[NH ₄ ⁺]	0,50	0,11	0,05	106,50
NO ₂ ⁻	12,5	0,00426	0,05	106,50
АСПАВ	10	0,0071	0,07	142,00
Итого $У_2$:				790,47

Таблица 4. Результаты расчета предотвращенного эколого-экономического ущерба

Параметр $У$, руб./год		Предотвращенный эколого-экономический ущерб, $У_1 - У_2$, руб./год
До мероприятий $У_1$, руб./год	После мероприятий $У_2$, руб./год	
147999,26	790,47	147208,80

- выход метана – 0,350 м³/кг ХПК;
 - теплотворная способность метана – 3,6·10⁷ Дж/м³;
 - теплотворная способность условного газообразного топлива – 2,9·10⁷ Дж/м³.

В масштабах Республики Татарстан по итогам 2020 года объем производства молока составил свыше 1,9 млн. т, объем переработки молока – 1 млн. т в июле 2020 г. Среднее водо-

потребление – 5,6 м³ воды/т молока. Расчетный объем сточных вод предприятий молокопереработки – 5,6 млн. т в год.

Таким образом, в случае внедрения анаэробных биотехнологий на молокоперерабатывающих предприятиях Республики Татарстан энергетический потенциал сточных вод составит 5,3 млн. кубометров условного газообразного топлива в год (табл. 5, 6).

Таблица 5. Результаты расчета образования метана на действующем предприятии

Объем образующихся сточных вод		ХПК	Степень очистки	Выход CH ₄	ХПК потребленный	Продукция CH ₄ в год	Продукция условного топлива
сутки	год						
м ³	м ³	кг/м ³		м ³ /кг	кг в год	м ³ в год	м ³ в год
200	71000	3,8	0,90	0,35	242 820	84987	66713

Таблица 6. Результаты расчета образования метана на предприятиях Республики Татарстан

Объем образующихся сточных вод	ХПК	Степень очистки	Выход CH ₄	ХПК потребленный	Объем CH ₄ в год	Объем условного топлива
м ³ в год	кг/м ³		м ³ /кг	кг в год	м ³ в год	м ³ в год
5600000	3,8	0,90	0,35	19152000	6703200	5261898

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные расчеты показывают, что годовой экологический эффект от внедрения разработанной анаэробно-аэробной биотехнологии очистки сточных вод молокоперерабатывающего предприятия составит 147208,80 руб.

При внедрении анаэробной биотехнологии очистки сточных вод на обследованном предприятии объем образующегося альтернативного климатически нейтрального источника энергии биогаза может составить до 66 тысяч кубометров в год, а в масштабах Республики Татарстан – до 5,3 млн. кубометров условного топлива в год.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Государственный доклад «О состоянии природных ресурсов и об охране окружающей среды Республики Татарстан в 2020 году». – Казань, 2021. – 400 с.
2. Ahmad, T. Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. / T. Ahmad, R.M. Aadil, H. Ahmed, U. ur Rahman, B.C.V. Soares, S.L.Q. Souza, A.G. Cruz // Trends Food Sci. Technol. – 2019. – Vol. 88. – No. December 2018. – P. 361-372.
3. Kolev Slavov, A. General Characteristics and Treatment Possibilities of Dairy Wastewaters – A Review // Food Technol. Biotechnol. – 2017. – Vol. 55. – No. 1. – P. 14-28.
4. Zhao, K. Biological treatment of dairy wastewater: A mini review / K. Zhao, Y.W. Wu, S. Young, X.J. Chen // Environ. Informatics Lett. – 2020. – Vol. 4. – P. 22-31.
5. Tocchi, C. Dairy wastewater polluting load and treatment performances of an industrial three-cascade-reactor plant / C. Tocchi, E. Federici, S. Scargetta, A. D'Annibale, M. Petruccioli // Process Biochem. – 2013. – Vol. 48, No. 5-6. P. 941-944.
6. Реестр перерабатывающих предприятий Республики Татарстан. – URL: <https://www.dairynews.ru/news/v-top-100-zavodov-po-kolichestvu-lidirueta-tatarsta.html> (дата обращения 14.01.2022).
7. Баланов, П.Е. Биотехнология и биоэнергетика в решении вопросов экологии / П.Е. Баланов, И.В. Смолтраева, О.Б. Иванченко, Р.Э. Хабибуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2015. – Т. 18. – № 5. – С. 229-232.
8. Хабибуллин, Р.Э. Анализ энергетической эффективности анаэробно-аэробной технологии очистки сточных вод молочного производства / Р.Э. Хабибуллин, А.М. Петров, И.В. Князев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Т. 17. – № 1. – С. 232-234.
9. Rajeshwari, K.V. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment / K.V. Rajeshwari, M. Balakrishnan, A. Kansal, K. Lata, V.V.N. Kishore // Renew. Sustainable Energy Rev. – 2000. – Vol. 4. – No. 2. – P. 135-156.
10. Demirel, B. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review / B. Demirel, O. Yenigun, T.T. Onay // Process Biochem. – 2005. – Vol. 40. – No 8. – P. 2583-2595.
11. Göblös, S. Comparison of the effectivities of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment / S. Göblös, P. Portöro, D. Bordás, M. Kálmán, I. Kiss // Renewable Energy. – 2008. – Vol. 33. – No 5. – P. 960-965.
12. Хабибуллин, Р.Э. Влияние разделения фаз на эффективность процесса очистки сточных вод молочного производства / Р.Э. Хабибуллин, А.М. Петров, И.В. Князев, Н.Ю. Крапивина // Георесурсы. – 2011. – № 5 (41). – С. 22-26.
13. Рекус, И.Г. Основы экологии и рационального природопользования: Учебное пособие / И.Г. Рекус, О.С. Шорина. – М.: Изд-во МГУП, 2001. – 146 с.
14. Методика определения предотвращенного экологического ущерба. Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды. – Москва, 1999.
15. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба. – Москва, 1999. – 41 с.
16. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 N 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 N 45203).
17. СанПиН 2.1.5.980-00. 2.1.5. Водоотведение населенных мест, санитарная охрана водных объектов. Гигиенические требования к охране поверхностных вод. Санитарные правила и нормы (утв. Главным государственным санитарным врачом РФ 22.06.2000) (с изм. от 04.02.2011, с изм. от 25.09.2014).
18. Хабибуллин, Р.Э. Энергетический потенциал сточных вод пищевых производств Республики Татарстан в процессе их анаэробной очистки / Р.Э. Хабибуллин, И.В. Князев, Э.Ф. Хасанова, А.М. Петров // ЕвразияБио-2010: сб. трудов международного конгресса. – Москва, 2010. – С. 201-203.

EVALUATION OF THE ENVIRONMENTAL EFFICIENCY OF THE ANAEROBIC-AEROBIC WASTEWATER PURIFICATION TECHNOLOGY IN THE DAIRY PROCESSING ENTERPRISE

© 2022 H.T. Le^{1,2}, R.E. Khabibullin¹, A.M. Petrov³

¹ Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

² Viet Tri University of Industry, VietNam

³ Institute of Ecology and Subsoil Use of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, Kazan, Russia

The article describes the results of calculations of the environmental efficiency of the implementation of the developed biotechnology for anaerobic-aerobic wastewater treatment for a milk processing enterprise operating on the territory of the Republic of Tatarstan. With the treatment of wastewater generated at the enterprise in the amount of 200 m³/day using the developed technology, the annual economic effect will be 147208,80 rubles. The results of calculating the energy efficiency of the operation of an anaerobic-aerobic wastewater treatment plant with the production of climate-neutral fuel - biogas are presented.

Keywords: Wastewater, dairy industry, anaerobic-aerobic wastewater treatment, economic and environmental efficiency.

DOI: 10.37313/1990-5378-2022-24-6-160-164

REFERENCES

1. Gosudarstvennyj doklad «O sostoyanii prirodnyh resursov i ob ohrane okruzhayushchej srede Respubliki Tatarstan v 2020 godu». Kazan, 2021. – 400 s.
2. Ahmad, T. Treatment and utilization of dairy industrial waste: A review. / T. Ahmad, R.M. Aadil, H. Ahmed, U. ur Rahman, B.C.V. Soares, S.L.Q. Souza, A.G. Cruz // Trends Food Sci. Technol. – 2019. – Vol. 88. No. December 2018. – P. 361-372.
3. Kolev Slavov, A. General Characteristics and Treatment Possibilities of Dairy Wastewaters – A Review // Food Technol. Biotechnol. – 2017. – Vol. 55. – No. 1. – P. 14-28.
4. Zhao, K. Biological treatment of dairy wastewater: A mini review / K. Zhao, Y.W. Wu, S. Young, X.J. Chen // Environ. Informatics Lett. 2020. Vol. 4. P. 22-31.
5. Tocchi, C. Dairy wastewater polluting load and treatment performances of an industrial three-cascade-reactor plant / C. Tocchi, E. Federici, S. Scargetta, A. D'Annibale, M. Petruccioli // Process Biochem. 2013. Vol. 48, No. 5-6. P. 941-944.
6. Reestr pererabatyvayushchih predpriyatij Respubliki Tatarstan. <https://www.dairynews.ru/news/v-top-100-zavodov-po-kolichestvu-lidirueta-tatarsta.html>
7. Balanov, P.E. Biotekhnologiya i bioenergetika v reshenii voprosov ekologii / P.E. Balanov, I.V. Smotraeva, O.B. Ivanchenko, R.E. Habibullin // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2015. – T. 18. – № 5. – С. 229-232.
8. Habibullin R.E. Analiz energeticheskoy effektivnosti anaerobno-aerobnoj tekhnologii oчитki stochnyh vod molochnogo proizvodstva / R.E. Habibullin, A.M. Petrov, I.V. Knyazev // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta. – 2014. – T. 17. – № 1. – S. 232-234.
9. Rajeshwari, K.V. State-of-the-art of anaerobic digestion technology for industrial wastewater treatment / K.V. Rajeshwari, M. Balakrishnan, A. Kansal, K. Lata, V.V.N. Kishore // Renew. Sustain. energy Rev. – 2000. – Vol. 4. – No. 2. – P. 135-156.
10. Demirel, B. Anaerobic treatment of dairy wastewaters: A review / B. Demirel, O. Yenigun, T.T. Onay // Process Biochem. – 2005. – Vol. 40. – No 8. – P. 2583-2595.
11. Göblös, S. Comparison of the effectivities of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment / S. Göblös, P. Portöro, D. Bordás, M. Kálmán, I. Kiss // Renewable Energy. – 2008. – Vol. 33. – No 5. – P. 960-965.
12. Habibullin, R.E. Vliyanie razdeleniya faz na effektivnost' processa oчитki stochnyh vod molochnogo proizvodstva / R.E. Habibullin, A.M. Petrov, I.V. Knyazev, N.YU. Krapivina // Georesursy. – 2011. – № 5 (41). – S. 22-26.
13. Rekus, I.G. Osnovy ekologii i racional'nogo prirodopol'zovaniya: Uchebnoe posobie / I.G. Rekus, O.S. SHorina. – M.: Izd-vo MGUP, 2001. – 146 s.
14. Metodika opredeleniya predotvrashchennogo ekologicheskogo ushcherba. Gosudarstvennyj komitet Rossijskoj Federacii po ohrane okruzhayushchej srede. – Moskva, 1999.
15. Vremennaya metodika opredeleniya predotvrashchennogo ekologicheskogo ushcherba – Moskva, 1999. – 41 s.
16. Prikaz Minsel'hoza Rossii ot 13.12.2016 N 552 "Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimyh koncentracij vrednyh veshchestv v vodah vodnyh ob"ektov rybohozyajstvennogo znacheniya" (Zaregistrirvano v Minyuste Rossii 13.01.2017 N 45203).
17. SanPiN 2.1.5.980-00. 2.1.5. Vodootvedenie naseleennyh mest, sanitarnaya ohrana vodnyh ob"ektov. Gigienicheskie trebovaniya k ohrane poverhnostnyh vod. Sanitarnye pravila i normy (utv. Glavnym gosudarstvennym sanitarnym vrachom RF 22.06.2000) (s izm. ot 04.02.2011, s izm. ot 25.09.2014).
18. Habibullin, R.E. Energeticheskij potencial stochnyh vod pishchevyh proizvodstv Respubliki Tatarstan v processe ih anaerobnoj oчитki / R.E. Habibullin, I.V. Knyazev, E.F. Hasanova, A.M. Petrov // EvraziyaBio-2010: sb. trudov mezhdunarodnogo kongressa. – Moskva, 2010. – S. 201-203.

Le Huong Thao, Graduate Student at the Department of Technology of Dairy and Meat Products.

E-mail: lehuongthao2706@gmail.com

Rustem Khabibullin, Doctor of Technics, Professor at the Department of Technology of Dairy and Meat Products.

E-mail: hrustik@yandex.ru

Andrey Petrov, Candidate of Biological Sciences.

E-mail: zpam2@rambler.ru