

М.Г. ЗИНЧЕНКО, Є.Д. ПОНОМАРЕНКО, Н.О. БУКАТЕНКО, О.О. ГОЛУБКИНА

АНАЕРОБНА БІОЛОГІЧНА ОЧИСТКА СТІЧНИХ ВОД ВИРОБНИЦТВА ЦУКРУ

Водне господарство цукрових заводів характеризується високим рівнем споживання води і великим об'ємом стічних вод з високою концентрацією мінеральних і органічних забруднень. Для очищення стоків виробництва цукру переважно використовують споруди штучної біологічної очистки.

Найбільшого поширення в нашій країні отримала схема з двоступінчастими аеротенками, в той час як за кордоном застосовують анаеробно-аеробні схеми, що значно вигідніше, так як окислення великої кількості органічних речовин виключно в аеробних умовах пов'язане з високими енерговитратами. Застосування анаеробного зброджування на I ступені дозволяє зменшити концентрацію органічних речовин в стоках на 60-90%, а доочищення забруднень, які залишилися, здійснити в аеротенках II ступені при менших витратах енергії. Для оцінки доцільності застосування метантенка в системі очисних споруд конкретного підприємства необхідно мати інформацію про ефективність зброджування і оптимальний режим очищення стічних вод цього підприємства. У даній роботі вивчали процес анаеробного зброджування стічних вод одного з цукрових заводів України. Експерименти проводили в біореакторі з висхідним потоком активного мулу. Для скорочення тривалості досліджень застосували метод математичного планування експерименту. В результаті були отримані дані відносно впливу визначальних чинників (швидкості подачі потоку, рН, температури) на вихід біогазу та глибину зброджування субстрату. Отримані дані доводять ефективність і перспективність застосування анаеробного зброджування на першій стадії біологічного очищення стічних вод буроцукрового виробництва.

Ключові слова: стічні води виробництва цукру, біологічна очистка, анаеробне зброджування, біогаз, технологічний режим, оптимізація.

М.Г. ЗИНЧЕНКО, Е.Д. ПОНОМАРЕНКО, Н.А. БУКАТЕНКО, О.А. ГОЛУБКИНА

АНАЭРОБНАЯ БИОЛОГИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ПРОИЗВОДСТВА САХАРА

Водное хозяйство свеклосахарных заводов характеризуется высоким уровнем потребления воды и большим объемом образующихся сточных вод с высокой концентрацией минеральных и органических загрязнений. Для очистки стоков производства сахара преимущественно используют сооружения искусственной биологической очистки. Наибольшее распространение в нашей стране получила схема с двухступенчатыми аэротенками, в то время как за рубежом применяют анаэробно-аэробные схемы, что значительно более выгодно, так как окисление большого количества органических веществ исключительно в аэробных условиях сопряжено с высокими энергозатратами. Применение анаэробного сбраживания на I ступени позволяет уменьшить концентрацию органических веществ в стоках на 60 – 90%, а доочистку оставшихся загрязнений осуществить в аэротенках II ступени при меньших расходах энергии. Для оценки целесообразности применения метантенка в системе очистных сооружений конкретного предприятия необходимо иметь информацию об эффективности сбраживания и оптимальном режиме очистки сточных вод этого предприятия. В данной работе изучали процесс анаэробного сбраживания сточных вод одного из свеклосахарных заводов Украины. Эксперименты проводили в биореакторе с восходящим потоком активного ила. Для сокращения продолжительности исследований применили метод математического планирования эксперимента. В результате были получены данные о влиянии определяющих факторов (скорости подачи потока, рН, температуры) на выход биогаза и глубину сбраживания субстрата. Полученные данные доказывают эффективность и перспективность применения анаэробного сбраживания на первой стадии биологической очистки сточных вод свеклосахарного производства.

Ключевые слова: сточные воды производства сахара, биологическая очистка, анаэробное сбраживание, биогаз, технологический режим, оптимизация.

М.Г. ZINCHENKO, E.D. PONOMARENKO, N. A. BUKATENKO, O.A. HOLUBKINA

ANAEROBIC BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT OF SUGAR PRODUCTION

Water usage of sugar beet factories is characterized by a high level of consumption and a large volume of generated wastewater with a high concentration of mineral and organic pollution. Artificial biological purification facilities are mainly used for purification of sugar production effluents. While a scheme with two-stage aeration tanks is the most widespread in our country, anaerobic-aerobic regimens are frequently used abroad. It is more cost-effective, since the oxidation of large amounts of organic substances exclusively under aerobic conditions is associated with high energy consumption. The use of anaerobic digestion at the first stage allows reducing the concentration of organic substances in effluents by 60-90%, while the post-purification of remaining contaminants is carried out in stage-two aeration tanks with lower energy consumption. To assess the appropriateness of using a digester in the system of purification facilities of a particular enterprise, it is necessary to have information on the

© М.Г. Зінченко, Є.Д. Пономаренко, Н.О. Букаченко, О.О. Голубкіна, 2020

effectiveness of digestion and the optimal purification regime of the wastewater of that particular enterprise. This work studies the process of anaerobic digestion of wastewater at one of the beet sugar factories in Ukraine. The experiments were carried out in a bioreactor with an upward flow of activated sludge. The method of mathematical planning of an experiment was used in order to shorten the duration of the research. As a result, data was obtained regarding the influence of determining factors (flow rate, pH, temperature) on biogas yield and substrate fermentation depth. Received data proves the effectiveness and prospects of using anaerobic digestion in the first stage of biological fermentation of wastewater at a sugar beet production.

Keywords: sugar production wastewater, biological treatment, anaerobic digestion, biogas, technological regime, optimization.

Вступ. Особливість стічних вод цукрових заводів полягає у високій концентрації в їх складі зважених речовин органічного і мінерального походження і розчинених органічних забруднень, в дефіциті біогенних речовин (сполук фосфору і азоту), присутності сапоніну, що негативно впливає на біологічну очистку, а також сезонності їх утворення. У зв'язку з високим вмістом забруднюючих речовин, ці стічні води не можуть бути спрямовані на міські очисні споруди або природні водойми без попередньої (локальної) очистки. Найбільшого поширення для очищення стічних вод цукрових заводів отримав аеробний метод.

Однак змінний склад стічних вод і висока концентрація забруднень (більше 2000 мг / л ХСК) часто призводить до переважання споруд аеробного біологічного очищення, в результаті чого забруднення безперешкодно потрапляють в навколишнє середовище. Ефективним вирішенням цієї проблеми може бути застосування схеми очищення висококонцентрованих стоків, що включають два ступені аеротенків. Однак для досягнення заданих показників за ступенем очищення води час аерації на другому ступені має бути в три - п'ять разів більше, ніж на першій, а це вимагає великих експлуатаційних витрат. З появою нових конструкцій анаеробних реакторів зі зваженим шаром біомаси та іммобілізованими мікроорганізмами з'явилася можливість використовувати метанове зброджування в якості першого ступеня очищення рідини.

Застосування метантенков для обробки стічної води перед аеротенками дозволить видалити до 90 % забруднень і отримати стоки з біохімічним складом, сприятливим для подальшої аеробного очищення. Це, в свою чергу, приблизно в 5 – 10 разів знизить витрати на аерацію, обсяги спорудження та експлуатаційні витрати.

Літературний огляд. Цукробурякові заводи є найбільшими в харчовій промисловості споживачами води, витрата якої становить близько 1800 % до маси буряка, що переробляється (без повторного і оборотного водопостачання). Однак на ряді ділянок виробництва можна повторно застосовувати відпрацьовану воду без очищення або освітлену, в результаті чого безповоротна витрата чистої води скорочується до

170...250 % до маси буряка [1, 2]. Відпрацьовану воду в залежності від ступеня забруднення ділять на три категорії: малозабруднені (I категорія), транспортерно-мийні (II категорія) і забруднені (III категорія). Виробничими стічними водами є тільки стоки III категорії, так як води I і II категорій після відповідної очистки використовуються в системах оборотного водопостачання [3]. Виробничі стічні води містять велику кількість органічних і мінеральних домішок: БСК_п досягає 2000 – 8000 мг / л, ХСК – 4000 – 10000 мг / л, концентрація зважених речовин – 700 – 50000 мг / л. Відношення БСК_п / ХСК дорівнює 71,4%, що дає можливість успішно очищати стоки від органічних забруднень біологічними методами [2].

В даний час найбільш широке застосування знаходить очистка за допомогою аеробних мікроорганізмів, що здійснюється в аеротенках, біофільтрах. Досвід багаторічної експлуатації споруд біологічного очищення на цукрових заводах нашої країни і за кордоном показав, що для швидкої і глибокої очистки цих стоків необхідно в схему включати дві або три ступені аеротенків. Однак суттєвими недоліками цих технологій є високі енерговитрати на аерацію, значні займані площі під очисні споруди, а також проблеми, пов'язані з обробкою і утилізацією великих кількостей надлишкового мулу, що утворюється. Виправити вказані недосконалості даних технологій може анаеробна обробка стічних вод [4, 5].

Доцільність застосування анаеробних процесів для очищення концентрованих стоків промислових підприємств обумовлена здатністю анаеробних мікроорганізмів продукувати енергетичну сировину (біогаз) і знижувати концентрацію субстратів до рівня, прийняттого для подальшого застосування аеробного очищення. Загальна собівартість аеробно-анаеробної технології в біореакторах значно нижче традиційної двоступеневої аеробної очистки, а надійність і якість очищення стоку – вище. (ХСК знижується на 70 – 95%, БСК_п – на 85 – 90 %) [6].

Перші аеробно-анаеробні установки, застосовані в Німеччині, були оснащені контактними метантенками з вільно плаваючою мікрофлорою. Як показав досвід, ці реактори дуже чутливі до коливань рН, температур, вихідного навантаження [6, 7]. Істотним

недоліком цих апаратів стосовно виробництва цукру, що має сезонний характер, є втрата активності мікрофлори в період зупинки заводу, при тому, що для її відновлення потрібен тривалий час (близько 60 днів) [3].

З розвитком техніки зброджування з'явилися реактори другого покоління зі зважено-седиментуючою біомасою (мулом) і прикріпленою біомасою (біоплівкою) [6,8]. Вони стали основними спорудами для очищення висококонцентрованих стічних вод, забезпечуючи ефективну очистку стоків в широкому діапазоні концентрацій ($BCK_{\text{п}} = 0,3 - 100 \text{ г / л}$). Найбільше застосування в світі отримали реактори типу UASB – з висхідним потоком рідини через шар анаеробного гранульованого мулу. Мінімальний час перебування води в такому апараті становить 6 – 15 год. при 85 – 90% очищення по ХСК. Великою перевагою цих реакторів для використання в цукробуряковому виробництві є властивість анаеробного гранульованого мулу зберігатися місяцями під шаром води без істотного падіння активності [9,10]. Введення очисних споруд після тривалої зупинки займає від кількох годин до кількох днів. Переваги нових конструкцій анаеробних біореакторів дають можливість використовувати метанове зброджування як перший ступінь очищення стічних вод виробництва цукру.

Мета і завдання дослідження Мета досліджень полягає у визначенні оптимальних умов анаеробного зброджування стічних вод бурякоцукрового виробництва. З урахуванням того, що кожен субстрат має певне співвідношення розчинених і зважених речовин, і неможливо заздалегідь передбачити, як глибоко він буде зброджений в даному реакторі, завданням досліджень є експериментальне визначення кінетичних характеристик процесу зброджування стічних вод конкретного цукрового виробництва.

Для вирішення поставлених завдань був реалізований планований експеримент. Найбільш строго процес анаеробного зброджування характеризується величиною виходу біогазу з одиниці маси збродженої речовини, тому в якості параметра оптимізації був прийнятий питомий вихід біогазу $Y, \text{ м}^3 / \text{кг ХСК} \cdot \text{год.}$; при цьому умовою ефективності процесу було максимальне зниження забрудненості стоків, тому в кожному досліді контролювали концентрації БСК і ХСК в очищеній воді. Як фактори, що роблять визначальний вплив на вихід біогазу, були прийняті: гідравлічний час перебування стоків у реакторі (год.), рН субстрату, температура зброджування ($^{\circ}\text{C}$), швидкість подачі потоку в реактор (л / хв)

Матеріали і методи проведення дослідження.

Об'єктом дослідження були стічні води одного з цукрових заводів України, склад яких наведено в табл. 1.

Таблиця 1–Склад виробничих стічних вод, що надходять на очистку

№ п/п	Показник	Одиниця виміру	Значення показника
1	рН середовища		7,6
2	ХСК	мг/л	5830
3	БСК	мг/л	4560
4	Зважені речовини	мг/л	15270

Дослідження проводилися на базі лабораторної установки, описаної в [11], у якій контактний реактор був замінений на UASB – реактор об'ємом 20 л (рис. 1).

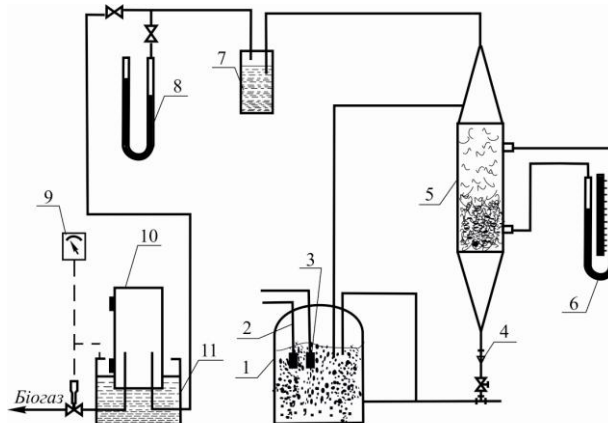


Рисунок 1 – Схема лабораторної установки

- 1 – бак – підготовлювач; 2 – нагрівальний елемент;
3 – термопара; 4 – ротаметр; 5 – анаеробний реактор;
6 – манометр; 7 – гідрозатвір; 8 – манометр; 9 – газований лічильник; 10 – стакан; 11 – ємність

Підготовку стічних вод до експерименту здійснювали в баку – підготовлювачі. Субстрат підігрівали до потрібної температури за допомогою нагрівальної котушки; початкове рН в ньому підтримували за допомогою 0,1 N нормального розчину H_2SO_4 або 1 M суспензії CaCO_3 . Анаеробний гранульований мул доставляли з діючого UASB – реактора картонно-тарного підприємства. Активний мул проходив адаптацію до стічних вод цукрового заводу при температурі 30°C протягом 7 днів, після чого його викладали щільним шаром на дні лабораторного реактора. Стічні води поступали в нижню частину біореактора і проходили через гранульований шар мулу зі швидкістю, достатньою для інтенсивного перемішування, в результаті чого досягалось повне змішування стічних вод і активного осаду бактерій. Біогаз збирався в га-

згольдері. Відпрацьований активний мул повертався в приймальний бак. Контроль процесу проводили по показникам ХСК, БСК, виходу та складу біогазу.

При визначенні хімічних та бактеріологічних показників вихідних і зброджених стоків користувались стандартними методиками [12, 13]. Визначення концентрації іонів водню (рН) проводили з використанням рН-метру типу рН-305, аналіз газової фази на місткість в біогазі метану – за допомогою хроматографа «Газохром» типу ХТ-12.

Для дослідження взаємодії різних факторів, що впливають на процес анаеробного збродження стічних вод, у якості критеріїв оптимальності були обрані такі показники:

- вихід біогазу Y_1 , м³/кг орг. забр. по ХСК · год.,
- вихід метану Y_2 , м³/кг орг. забр. по ХСК · год.,
- ступінь очистки стічних вод по ХСК, Y_3 , %,
- ступінь очистки стічних вод по БСК, Y_4 , %,
- концентрація метану Y_5 , %.

Процес є ефективним, якщо всі показники набувають найбільших значень.

Сукупність факторів та інтервали їх варіювання, що суттєво впливають на процес, а тому на означені критерії, було визначено на основі апріорної інформації та попередніх дослідів:

- $z_1 \in 2, 12$ – гідравлічний час перебування

стоків у реакторі, год.;

- $z_2 \in 6, 8$ – рН субстрату;
- $z_3 \in 30, 45$ – температура збродження, °С;
- $z_4 \in 12, 18$ – швидкість подачі потоку, л/хв.

Фактори сумісні, та незалежні між собою.

Попередні досліди показали, що досліджувана область має властивість нелінійності. Тому для її адекватного опису логічно було використати поліноми другого порядку (1).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_k x_k + \beta_{12} x_1 x_2 + \dots + \beta_{k-1,k} x_{k-1} x_k + \beta_{11} x_1^2 + \dots + \beta_{kk} x_k^2 + \varepsilon \quad (1)$$

Для вирішення такої задачі було реалізовано ортогональний композиційний план другого порядку [14]. Плани другого порядку дають можливість описати поверхні другого порядку і визначити оптимальні точки процесу, що вивчається.

Межі зміни факторів наведені в табл. 2.

План експерименту та його результати – значення відгуків (Y_1 – вихід біогазу, Y_2 – вихід метану, Y_3 – ступінь очистки стічних вод по ХСК, Y_4 – ступінь очистки стічних вод по БСК, Y_5 – концентрація метану) наведені в табл. 3.

Таблиця 2 – Межі зміни вхідних параметрів

Умови планування	фактори у натуральному визначенні				кодовані значення факторів			
	z_1	z_2	z_3	z_4	x_1	x_2	x_3	x_4
Основний рівень	7	7	37,5	14	0	0	0	0
Інтервал варіювання	5	6	7,5	4	1	1	1	1
Верхній рівень	12	8	45	18	1	1	1	1
Нижній рівень	2	6	30	10	-1	-1	-1	-1
Верхня «зоряна» точка	14	8,4	48	19,6	1,414	1,414	1,414	1,414
Верхня «зоряна» точка	0	5,6	27	8,34	-1,414	-1,414	-1,414	-1,414

Таблиця 3 – Матриця планування та результати експерименту

№ дослідів	кодовані значення факторів				Y_1 , м ³ /кг·год.	Y_2 , м ³ /кг·год.	Y_3 , %	Y_4 , %	Y_5 , %
	x_1	x_2	x_3	x_4					
1	+1	+1	+1	+1	0,66	0,34	46,5	60,3	61
2	-1	-1	+1	+1	0,565	0,28	39,5	51	52,3
3	+1	-1	-1	+1	0,68	0,36	47,3	57	59
4	-1	+1	-1	+1	0,56	0,28	39,8	53	55,8
5	+1	-1	+1	-1	0,665	0,33	42	58	61,8
6	-1	+1	+1	-1	0,545	0,25	39,5	54	57,5
7	+1	+1	-1	-1	0,66	0,3	47	60	63,3
8	-1	-1	-1	-1	0,56	0,24	40,3	50,5	52,5
9	+1	-1	+1	+1	0,673	0,35	46,8	58	61,3

Продолжение таблицы 3

10	-1	+1	+1	+1	0,553	0,28	39,3	53,5	57
11	+1	+1	-1	+1	0,665	0,34	47	60	63,8
12	-1	-1	-1	+1	0,57	0,29	39,8	50,3	52
13	+1	+1	+1	-1	0,65	0,31	46,8	60,5	62,2
14	-1	-1	+1	-1	0,56	0,26	39,8	51,3	53,8
15	+1	-1	-1	-1	0,67	0,33	47,5	57,3	60,5
16	-1	+1	-1	-1	0,55	0,34	40	53	56,5
17	0	0	0	0	0,74	0,4	53,5	63	60
18	1,414	0	0	0	0,72	0,39	51,8	62	64,5
19	-1,414	0	0	0	0,57	0,33	42,5	50	53,5
20	0	1,414	0	0	0,71	0,36	50,8	63	66,5
21	0	-1,414	0	0	0,72	0,37	51,3	60	63
22	0	0	1,414	0	0,72	0,373	51,3	62	63,5
23	0	0	-1,414	0	0,73	0,39	52,5	61	64
24	0	0	0	49	0,7	0,385	50,5	60,3	63
25	0	0	0	-1,414	0,69	0,36	50,8	60,5	63,5

Для визначення похибки експерименту проведено 4 додаткових досліди.

При статистичній обробці експериментальних даних ортогонального композиційного плану другого порядку була виконана ортогоналізація матриці планування, перерахування коефіцієнтів перетвореної моделі, застосовані критерій Стьюдента для оцінки значимості коефіцієнтів математичної моделі та критерій Фішера для оцінки адекватності моделі.

За результатами статистичної обробки даних були отримані наступні оцінні математичні моделі другого порядку для обраних критеріїв оптимальності для кодованих значень факторів:

$$Y_1 = 0,765 + 0,054x_1 - 0,063x_1^2 - 0,028x_2^2 - 0,023x_3^2 - 0,038x_4^2, \quad (2)$$

$$Y_2 = 0,421 + 0,025x_1 - 0,033x_1^2 - 0,031x_2^2 - 0,022x_3^2 - 0,027x_4^2, \quad (3)$$

$$Y_3 = 63,78 + 3,574x_1 + 1,257x_2 - 3,988x_1^2 - 1,238x_2^2 - 1,238x_3^2 - 1,788x_4^2, \quad (4)$$

$$Y_4 = 67,108 + 3,553x_1 + 1,442x_2 - 4,193x_1^2 - 1,318x_2^2 - 1,318x_3^2 - 2,068x_4^2, \quad (5)$$

$$Y_5 = 55,924 + 3,328x_1 - 4,69x_1^2 - 2,74x_2^2 - 2,315x_3^2 - 2,94x_4^2. \quad (6)$$

Математична модель (2) адекватно описує залежність виходу біогазу в досліджуваній області системи факторів x_1, x_2, x_3, x_4 , що перевірено за критерієм Фішера: розрахункове значення менше від критичного значення для рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості степенів вільності $f_1 = 19, f_2 = 3$ ($F_p = 0,677 < F_{\text{крит}} = 8,677$).

Рівняння (3) адекватно описує залежність виходу метану від x_1, x_2, x_3, x_4 . Розрахункове значення критерію Фішера менше від критичного для рівня значущості $\alpha = 0,05$, кількості степенів вільності $f_1 = 19, f_2 = 3$ ($F_p = 2,67 < F_{\text{крит}} = 8,677$).

Для моделі (4) – ступінь очистки вод по ХСК розрахункове значення $F_p = 0,47 < F_{\text{крит}} = 8,675$ для $\alpha = 0,05, f_1 = 18, f_2 = 3$.

Для ступені очистки вод по БСК (5) – розрахункове значення $F_p = 1,08 < F_{\text{крит}} = 8,675$ для $\alpha = 0,05, f_1 = 18, f_2 = 3$.

Для концентрації метану (6) – розрахункове значення $F_p = 0,856 < F_{\text{крит}} = 8,677$ для $\alpha = 0,05, f_1 = 19, f_2 = 3$.

Аналіз отриманих рівнянь регресії показує, що найбільш впливовим фактором на відгуки є z_1 – технологічний час розкладання, год.

Для системи реальних факторів z_1, z_2, z_3, z_4 рівняння (2) – (6) були розкодовані; і отримані математичні моделі мають вигляд:

$$Y_1 = -1.833 + 0.046z_1 + 0.39z_2 + 0.03z_3 + 0.066z_4 - 2.514 \cdot 10^{-3} z_1^2 - 0.028z_2^2 - 4.062 \cdot 10^{-4} z_3^2 - 2.366 \cdot 10^{-3} z_4^2, \quad (7)$$

$$Y_2 = -2.061 + 0.023z_1 + 0.428z_2 + 0.03z_3 + 0.047z_4 - 1.322 \cdot 10^{-3}z_1^2 - 0.031z_2^2 - 3.964 \cdot 10^{-4}z_3^2 - 1.675 \cdot 10^{-3}z_4^2, \quad (8)$$

$$Y_3 = -71.31 + 2.948z_1 + 18.582z_2 + 1.65z_3 + 3.128z_4 - 0.16z_1^2 - 1.238z_2^2 - 0.022z_3^2 - 0.112z_4^2, \quad (9)$$

$$Y_4 = -79.003 + 3.058z_1 + 19.887z_2 + 1.757z_3 + 3.618z_4 - 0.168z_1^2 - 1.318z_2^2 - 0.023z_3^2 - 0.129z_4^2, \quad (10)$$

$$Y_5 = -186.077 + 3.292z_1 + 38.36z_2 + 3.087z_3 + 5.145z_4 - 0.188z_1^2 - 2.74z_2^2 - 0.041z_3^2 - 0.184z_4^2. \quad (11)$$

Рівняння регресії (7) – (11) дозволяють визначити значення параметрів оптимізації Y_1 – Y_5 при всіх можливих комбінаціях значущих чинників процесу. На підставі отриманої математичної моделі (11) було проведено обчислювальний експеримент по вивченню залежності виходу біогазу від всіх значущих факторів. Результати представлені у графічному вигляді (рис.2).

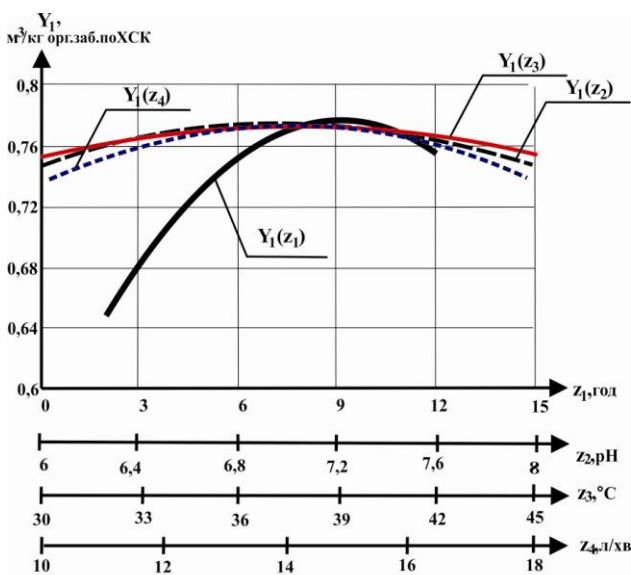


Рисунок 2 – Вплив значущих факторів процесу очистки стічних вод на вихід біогазу

Математичні моделі, побудовані на підставі ортогонального композиційного плану є моделями другого порядку і добре пристосовані для методів оптимізації.

Метою оптимізації в даному дослідженні було визначення такого оптимального процесу очистки

вод, для якого критерії оптимізації: Y_1 – вихід біогазу, Y_2 – вихід метану, Y_3 – ступінь очистки вод по ХСК, Y_4 – ступінь очистки вод по БСК, Y_5 – концентрація метану набувають максимальних значень.

Для розв'язання оптимізаційної задачі була побудована математична модель об'єкта оптимізації, що зв'язує критерій оптимальності з факторами (12).

$$\begin{aligned} Y_1(x_1, x_2, x_3, x_4) &\rightarrow \max; \\ Y_2(x_1, x_2, x_3, x_4) &\rightarrow \max; \\ Y_3(x_1, x_2, x_3, x_4) &\rightarrow \max; \\ Y_4(x_1, x_2, x_3, x_4) &\rightarrow \max; \\ Y_5(x_1, x_2, x_3, x_4) &\rightarrow \max; \\ -1,5 \leq x_j < 1,5; \quad j &= 1, \dots, 4. \end{aligned} \quad (12)$$

Модель оптимізації (12) являє собою складну багатокритеріальну задачу. Тому була висунута гіпотеза, що оскільки всі означені показники одного технологічного процесу пов'язані між собою, достатньо визначити точку оптимуму для одного критерію, а всі інші критерії будуть набувати максимальних значень у тій же точці.

Для перевірки цієї гіпотези спочатку був визначений максимум критерію $Y_4(x_1, x_2, x_3, x_4)$ методом найшвидшого спуску. Результат оптимізації:

$\max Y_4 = 68,3\%$ досягається у точці з координатами $\bar{x}_{\max} = (x_1 = 0,4; x_2 = 0,5; x_3 = 0; x_4 = 0)$, що в системі реальних факторів відповідає значенням $\bar{z}_{\max} = (z_1 = 9; z_2 = 7,5; z_3 = 37,5; z_4 = 14)$.

Після цього методом найшвидшого спуску були визначені максимуми всіх інших критеріїв. Значення критеріїв у винайдених точках максимуму відрізняється від значення у гіпотетичній точці в діапазоні $0,1\% \div 1,2\%$, що не перевищує похибок експерименту та обчислюваних методів і підтверджує запропоновану гіпотезу.

Висновки. Встановлені оптимальні параметри процесу очистки стічних вод цукрового виробництва, що складають: гідравлічний час перебування стоків у реакторі $z_1 = 9$ год.; рН субстрату $z_2 = 7,5$; температура зброджування, $z_3 = 37,5^\circ\text{C}$; швидкість подачі потоку $z_4 = 14$ л/хв.

За таких значень визначальних чинників процесу максимальний вихід біогазу складає $Y_1 = 0,769$ м³/кг орг. забр. по ХСК-год.; максимальний вихід метану

$Y_2 = 0,418 \text{ м}^3/\text{кг}$ орг. забр. по ХСК-год., максимальна ступінь очистки стічних вод по ХСК $Y_3 = 64,9 \%$, максимальна ступінь очистки стічних вод по БСК $Y_4 = 68,3 \%$, максимальна концентрація метану складає $Y_5 = 55,8 \%$.

Отримані дані доводять ефективність і доцільність застосування анаеробного зброджування на першій стадії біологічного очищення стічних вод цукрового виробництва.

Список літератури

1. Спичак В.В., Базлов В.Н., Ананьева П.А., Поливанова Т.В. Водное хозяйство сахарных заводов / ред. В.В. Спичак – Курск. : ГНУ РНИИСП Россельхозакадемии, 2005. – 167 с.
2. Пархомец А.П. Биологическая очистка сточных вод сахарных заводов. / А.П. Пархомец, В.И. Сергиенко. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 112 с.
3. Зубов М.Г. Очистка сточных вод сахарных заводов при сезонном режиме работы / М.Г. Зубов, Гетманский А.С. // САХАР. – 2017. – № 5. – С. 2-4
4. Hossaina Sk Masud Anaerobic biogas generation from sugar industry waste water in three-phase fluidized-bed bioreactor / Sk Masud Hossaina, N Anantharamanb, Manas Dasc // Indian Journal of Chemical Technology. – January 2009. – Vol. 16. – P. 58-64
5. Hampannavar U.S. Anaerobic treatment of sugar industry wastewater by Upflow anaerobic sludge blanket reactor at ambient temperature. / U.S. Hampannavar, C.B. Shivayogimath // International journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 1. – № 4. – P. 631-639
6. Henze M. et al Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. / M. Henze. Berlin: Springer-Verlag. – 2002. – 480 p
7. Долина Л. Ф. Реакторы для очистки сточных вод [Текст] / Л. Ф. Долина. – Днепропетровск.: Стандарт, 2001. – 80 с.
8. Lettinga, G. Use of the Upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment [Text] / G. Lettinga, A. F. M. Velsen, S. W. Hobma, W. Zeeuw, A. Klapwijk // Especially for Anaerobic Treatment. Biotechnology and Bioengineering. – 1980. – № 22. – P. 699-734.
9. Switzenbaum M. S. et al Anaerobic Treatment Technology for Municipal and Industrial Wastewaters. Water Sci. Technol. – 1991. – Vol. 24. – № 8 – P. I.
10. Калюжный С. В. Высокоинтенсивные анаэробные биотехнологии очистки промышленных сточных вод [Текст] / С. В. Калюжный // Катализ в промышленности. – 2004. – № 6. – С. 42-50.
11. Семененко И.В. Оборудование и процессы метанового сбраживания органических отходов: монография / И.В. Семененко, М.Г. Зинченко – Харьков.: Підручник НТУ «ХПИ», 2012. – 272 с.
12. Бугаенко И.Ф. Анализ производственных и сточных вод сахарного производства / И.Ф. Бугаенко – М.: ООО «Телер» – 2000. – 64 с.
13. Славянский А.А. Лабораторный практикум по технологии сахара / А.А. Славянский, Г.А. Вовк, А.М. Гаврилов – М.: Издательский комплекс МГУПП, 2003. – 104 с.
14. Товажнянський Л.Л. Комп'ютерне моделювання у хімічній технології / Товажнянський Л.Л., Бабак Т.Г., Голубкіна О.О., Пономаренко Є.Д., Сатарін А.В. – Харків, НТУ: «ХП» – 2011. – 606 с.

References (transliterated)

1. Spichak V.V., Bazlov V.N., Anan'eva P.A., Polivanova T.V. Vodnoe khozyajstvo sakharny'kh zavodov / red. V.V. Spichak – Kursk: GNU RNIISP Rossel'khozakademii, 2005. – 167 c.
2. Parkhomecz A.P. Biologicheskaya ochistka stochnykh vod sakharnykh zavodov. / A.P. Parkhomecz, V.I. Sergienko. – M.: Legkaya i pishhevaya promyshlennost', 1984–112 c.
3. Zubov M.G. Ochistka stochnykh vod sakharnykh zavodov pri sezonnom rezhime raboty / M.G. Zubov, A.S. Getmanskij // SAKHAR. – 2017. – № 5. – С. 2-4
4. Hossaina Sk Masud Anaerobic biogas generation from sugar industry wastewaters in three-phase fluidized-bed bioreactor / Sk Masud Hossaina, N Anantharamanb, Manas Dasc // Indian Journal of Chemical Technology. – January 2009. – Vol. 16. – p. 58-64
5. Hampannavar U.S. Anaerobic treatment of sugar industry wastewater by Upflow anaerobic sludge blanket reactor at ambient temperature. / U.S. Hampannavar, C.B. Shivayogimath // International journal of Environmental Sciences. – 2010. – Vol. 1. – № 4. – P. 631-639
6. Henze M. et al Wastewater Treatment. Biological and Chemical Processes. / M. Henze. Berlin: Springer-Verlag, 2002. – 480 p
7. Dolina L. F. Reaktory` dlya ochistki stochnykh vod [Tekst] / L. F. Dolina. – Dnepropetrovsk.: Standart, 2001. – 80 c
8. Lettinga, G. Use of the Upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment [Text] / G. Lettinga, A. F. M. Velsen, S. W. Hobma, W. Zeeuw, A. Klapwijk // Especially for Anaerobic Treatment. Biotechnology and Bioengineering. – 1980. – № 22. – P. 699-734.
9. Switzenbaum M. S. et al Anaerobic Treatment Technology for Municipal and Industrial Wastewaters. Water Sci. Technol. – 1991. – Vol. 24. – № 8 – P. I.
10. Kalyuzhny`j, S. V. Vysokointensivnye anaerobnye biotekhnologii ochistki promyshlennykh stochnykh vod [Tekst] / S. V. Kalyuzhny`j // Kataliz v promyshlennosti. – 2004. – № 6. – С. 42-50.
11. Semenenko I.V. Oborudovanie i processy` metanovogo sbrzhivaniya organicheskikh otkhodov: monografiya / I.V. Semenenko, M.G. Zinchenko – Kharkov.: Pidruchnik NTU «KhPI», 2012. – 272 c.
12. Bugaenko I.F. Analiz proizvodstvennykh i stochnykh vod sakharnogo proizvodstva / I.F. Bugaenko – M.: ООО «Телер», 2000. – 64 с
13. Slavyanskij A.A. Laboratornyj praktikum po tekhnologii sakhara / A.A. Slavyanskij, G.A. Vovk, A.M. Gavrilov – M.: Izdatelskij kompleks MGUPP, 2003. – 104 c.
14. Tovazhnianskyi L.L. Komp'iuterne modeliuвання u khimichnii tekhnologii / Tovazhnianskyi L.L., Babak T.H., Holubkina O.O., Ponomarenko Ye.D., Satarin A.V. – Kharkiv, NTU: «KhPI»; 2011. – 606c.

Надійшло (received) 24.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Зінченко Марія Георгіївна (Zinchenko Mariya) кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, професор, кафедра хімічної техніки та промислової екології; м. Харків, Україна; ORCID: [http://orcid.org/\(0000-0001-7984-2881\)](http://orcid.org/(0000-0001-7984-2881));
e-mail: mazinchen999@gmail.com.

Пономаренко Євгенія Дмитрівна (Ponomarenko Evgeniya) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент, кафедра інтегрованих технологій, процесів і апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9878-6093>;
e-mail: yevgeniya.ponomarenko@gmail.com.

Букаченко Наталія Олексіївна (Bukatenko Nataliia) кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент, кафедра охорони праці і навколишнього середовища; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4115-1422>;
e-mail: bukanya75@gmail.com.

Голубкіна Ольга Олександрівна (Golubkina Olga) Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший викладач, кафедра інтегрованих технологій, процесів і апаратів; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4515-8533>;
e-mail: oalgotlubkina@gmail.com.