

УДК 663.143.012.44:544.723.22-0.26.71

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЕРОБНОЇ ОБРОБКИ РІДКИХ СУБСТРАТІВ

С. М. БОНДАР¹, О. Б. ЧАБАНОВА², А. А. ТРУБНІКОВА²

¹ Кафедра екології та природоохоронних технологій, ОНАХТ, м.Одеса, УКРАЇНА

² Кафедра технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, ОНАХТ, м.Одеса, УКРАЇНА

*email: sn_bondar@list.ru

АНОТАЦІЯ Розглянуто пристрій на базі конічної поверхні що обертається для поліпшення масопереносу між рідиною і газом. За рахунок відцентрової сили на поверхні зануреного конуса формується тонка плівка рідини, що утворює значну площу контакту плівки і газової фази. Встановлено, що масообмін між рідиною і газом стосовно оксигену залежить від швидкості обертання конуса і глибини його занурення. Визначено питомі енерговитрати процесу. Наведено дані щодо піноутворення для даного варіанту пристрою у порівнянні із традиційним ферментером. Проведено математичний аналіз основних залежностей процесу масообміну між рідиною і газом. Запропоновано просту модель, що адекватно відображає сутність процесу.

Ключові слова: пристрій, аеробна ферментація, рідкі відходи, піноутворення, масообмін, математичний аналіз

INTENSIFICATION OF BIOTECHNOLOGICAL AEROBIC PROCESS OF TREATMENT OF LIQUID SUBSTRATES

S. BONDAR^{*1}, O. CHABANOVA², A. TRUBNIKOVA²,

¹ Department of ecology and environmental technologies, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

² Department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

*email: sn_bondar@list.ru

ABSTRACT Considered a device in the form of a conical surface rotating to improve the mass transfer between liquid and gas. Under the action of centrifugal force on the immersed surface of the cone forms a thin liquid pellicle, which forms a significant area of contact between the pellicle and gas phase. Found that the mass transfer between liquid and gas with addition to oxygen depends on the speed of rotation of the cone and the depth of his immersion. Were calculated the specific energy consumption of the process. Investigated the characteristics the flow of pellicle on the surface of the cone. It is established that with increasing speed the pellicle becomes continuous. The immersion depth of the cone significantly affects the angular velocity, which is necessary for the formation of a continuous film. The greater the immersion depth of the cone, the greater the angular velocity required. The obtained experimental data allow to make a good forecast of to use tapered aeration system not only in the open, but also closed fermenters. The concentric arrangement of the cones of rotation will significantly increase the aeration efficiency of various environments, including wastewater. Reported the data regarding the formation of foam for a given embodiment of the device in comparison with a traditional of the fermenter. Conducted mathematical analysis of the common dependencies of the process of mass transfer between liquid and gas. A model is proposed which adequately reflects the essence of the process.

Keywords: device, fermentation aerobic, liquid waste, foam formation, mass transfer, mathematical analysis

Вступ

У аеробних біотехнологічних процесах, що пов'язані з обробкою рідких відходів спосіб аерації має головне значення. Більшість мікроорганізмів не може споживати оксиген безпосередньо з повітря, тому їх забезпечення оксигеном повинне підтримуватись різними зовнішніми засобами [1, 2, 10, 13].

Коли концентрація розчиненого у воді оксигену зменшується, ріст мікроорганізмів швидко втрачає інтенсивність. Розчинність оксигену у більшості біотехнологічних субстратів невисока і складає менше за половину тієї, що у чистій воді. Таким чином забезпечення оксигеном і його ефективне розподілення є факторами, що обмежують

ріст біомаси у рідких субстратах, який визначає ефективність процесу у цілому [2, 4, 7, 14].

Зазвичай обладнання для культивування мікроорганізмів – це ємність, що оснащена мішалкою певної конструкції, арматурою для подачі допоміжних речовин, теплообмінником і елементами для стерильного повітря, яке слугує джерелом оксигену. Витрати енергії в такому разі становлять близько 2 кВт на 1 м³ рідкого субстрату [8, 9].

У окремих випадках повітря є засобом ефективного газового розподілу і перемішування середовища, наприклад, у еір-ліфтних системах [2, 9].

Для економічної оцінки ферментації дуже важливо знати, яку частину складають витрати енергії на одиницю перенесеного оксигену, у т. ч. на перемішування. Традиційно апаратура для

перемішування породжує низку проблем, що зменшують активність росту клітин мікроорганізмів. У тому числі процеси аерації і перемішування супроводжується значним піноутворенням, що зменшує корисний об'єм ферментера. Проблема вирішується додаванням хімічних та/або механічних засобів руйнації піни [5, 11, 12].

Хімічні піногасники промислового призначення мають у складі силікони – ефективні речовини, які, однак, суттєво погіршують перенос кисню [1, 3, 4]. Механічні піногасники потребують додаткових енерговитрат, ускладнюють конструкцію ферментера і не завжди можуть бути застосовані для великих об'ємів.

Мета роботи

Метою представлених досліджень є тестування конструкції, запатентованої свого часу у США [6], і модифікованої авторами для використання у аеробній ферментації рідких відходів у тому числі стічних вод. Представлена робота містить попередні результати випробувань конструкції.

Виклад основного матеріалу

Потужність двигуна під час обертання вимірювали. Обертання конуса, що занурений у рідину, призводив до утворення тонкої плівки на його поверхні у результаті дії відцентрової та гравітаційної сили. Коли плівка досягала кінця конуса вона зривалася з поверхні і утворювала краплі. Вони досягали стінки зовнішньої ємності, на поверхні якої утворювалася плівка, що падала. Швидкість потоку плівки регулювали і підтримували на певному рівні завдяки підтримуванию рівня рідини у внутрішній ємності, де містився занурений конус. Останній рівень рідини підтримували шляхом подавання рідини з живильної ємності за допомогою насоса. Витрати рідини при цьому контролювали ротаметром. Показання ротаметра фіксували тоді, коли рівень рідини у внутрішній ємності ставав незмінним. Циркуляційний насос подавав рідину у живильну ємність і процес повторювався.

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

Отриманні експериментальні данні використовували для визначення швидкості потоку рідини при різних швидкостях обертання конуса та його глибини занурення.

У якості об'єкта дослідження використовували дистильовану воду. Визначення концентрації кисню в дослідах проводили тільки для внутрішньої ємності з метою запобігання утворенню значної помилки при визначенні коефіцієнту масопереносу K_L при контакті «газ-рідина» у зовнішній ємності.

Утворення піни досліджувалось при додаванні до води 0,02% промислової поверхнево-активної

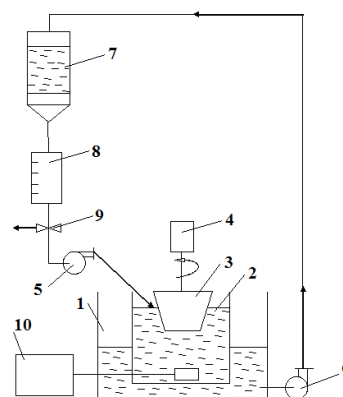


Рис. 1 – Принципова схема експериментальної установки:

1. Зовнішня ємність з рідиною; 2. Внутрішня ємність з рідиною; 3. Конус; 4. Мотор із змінною швидкістю; 5, 6 – насоси; 7. Живильна ємність; 8. Ротаметр; 9. Кран; 10. O_2 метр з датчиком кисню.

речовини Neodol 91-6, що була люб'язно надана для досліджень колегами фірми Юрія-фарм (м.Київ). Досліджуваний об'єкт за піноутворенням порівнювався з традиційним ферментером, що оснащений турбінною мішалкою. При цьому глибина занурення конуса становила 5 см при швидкості обертання 200 хв^{-1} . У ферментер з мішалкою повітря надходило зі швидкістю $1,3 \text{ л/хв}$. Загальний об'єм рідини у двох випадках дорівнював 5 л.

Обговорення результатів

На рис. 2 представлено швидкості потоків рідини в залежності від швидкості обертання конуса. До тих пір, поки швидкість не склала 160 хв^{-1} , плівка на поверхні конуса не була суцільною і покривала тільки частину поверхні. Діапазон швидкості $160...280 \text{ хв}^{-1}$ дав інший ефект. При більших швидкостях виявилось, що витрати енергії зростали інтенсивніше, аніж швидкість потоку плівки, що є негативним фактом.

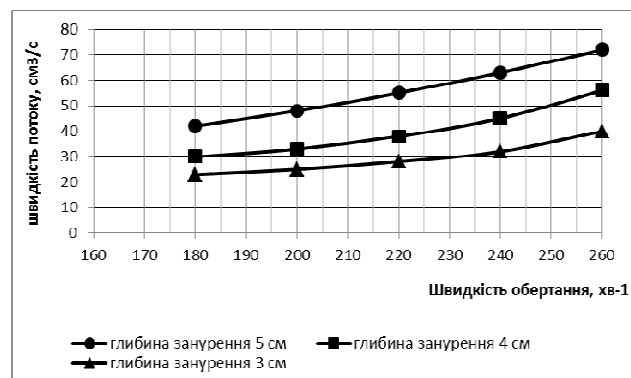


Рис. 2 – Швидкості потоку для конуса, що обертається

Кращі результати спостерігались, коли глибина занурення конуса становила 3...5 см. Глибина, менша за 3 см не давала стабільної плівки на поверхні конуса. Коли глибина занурення ставала більшою за 5 см на поверхні конуса залишалось дуже мало місця для утворення плівки. На поверхні плівки досліджувалось утворення невеликих хвиль спіральної конфігурації.

На рис. 3 представлено дані з переносу кисню при глибині занурення 5 см. Вони свідчать про зростання швидкості переносу кисню із зростанням швидкості обертання конуса.

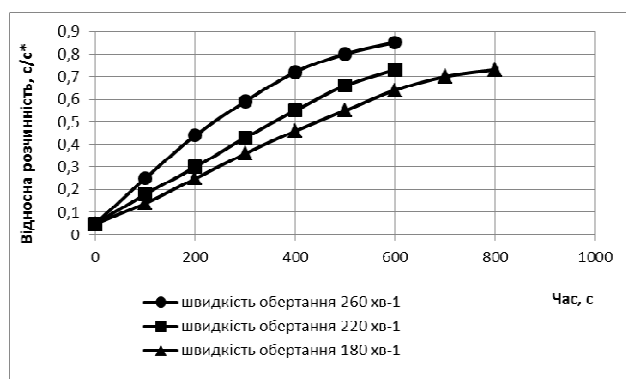


Рис. 3 – Залежність відносної розчинності кисню від часу при різних швидкостях

Отриманні результати можна оцінити за допомогою простої моделі, коли швидкість переносу кисню залежить від опору плівки рідини. Для цього випадку маємо:

$$\frac{dc}{dt} = K_i \times a \times (C^* - C), \quad (1)$$

де C – концентрація кисню у основному об'ємі рідини;

C^* – рівноважна концентрація кисню на границі «газ-рідина»;

a – поверхня контакту одиниці об'єму рідини;

K_i – коефіцієнт швидкості переносу;

t – час.

За допомогою інтегрування отримаємо наступне рівняння:

$$K_i \times a \times t = -\ln\left(1 - \frac{C}{C^*}\right). \quad (2)$$

На рис. 4 представлено залежності логарифму виразу $\left(1 - \frac{C}{C^*}\right)$ з часом. У напівлогарифмічних координатах, як бачимо криві стають прямими лініями. Це дозволяє отримати значення $K_i \times a$ у залежності від їх кута нахилення.

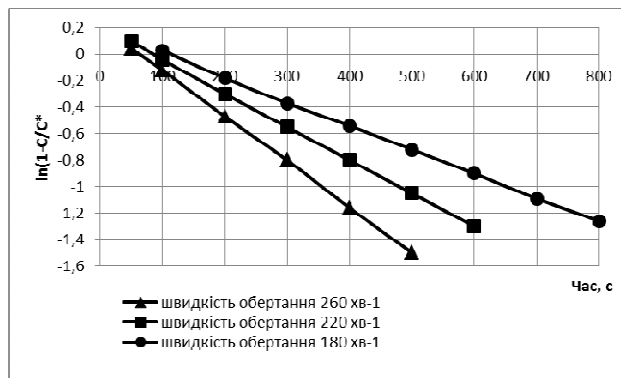


Рис. 4 – Графік для визначення коефіцієнту швидкості масопереносу. Глибина занурення 5 см

Дані енерговитрат, що пов'язані з переносом кисню представлено на рис.5. Вони визначені для трьох глибин занурення. Відносна розчинність кисню для цього випадку є функцією питомих енерговитрат. Графічні залежності доводять, що при глибині 3 см потрібно більше енерговитрат для еквівалентного значення переносу кисню, ніж при 5 см.

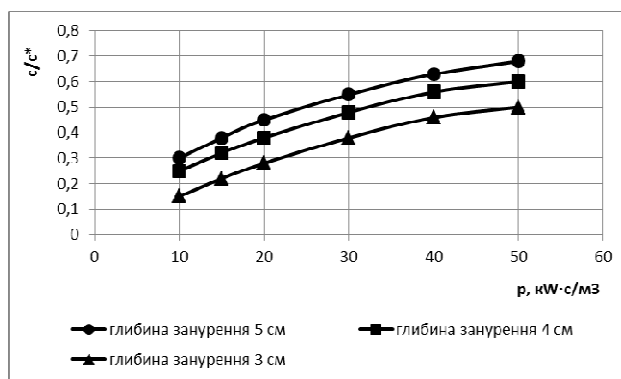


Рис. 5 – Залежність переносу кисню від енерговитрат

Динаміка зростання піни під час експерименту відображена на рис. 6. У випадку традиційного ферментера з газовою турбіною-мішалкою для аерації об'єм піни зростав дуже швидко, тоді коли для конуса це зростання є незначним.

При обертанні зануреного конуса на його поверхні під дією відцентрової сили утворюється плівка, що піднімається і переміщується до верхнього кінця конуса.

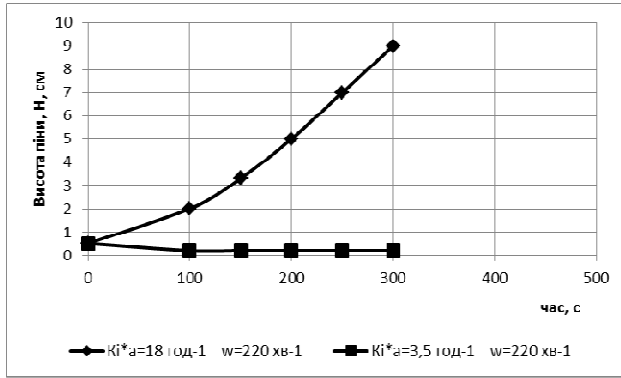


Рис.6 – Порівняльні дані піноутворення: розчин 0,02% Neodol у воді

На рис. 7. представлена принципова схема, що ілюструє дуже спрощений аналіз сил, що впливають на плівку. У стані, коли гравітаційна та відцентрова сила урівноважені, плівка не переміщується. Коли складова відцентрової сили, що паралельна поверхні конуса, перевищить таку ж складову сили гравітації, плівка почне підніматись.

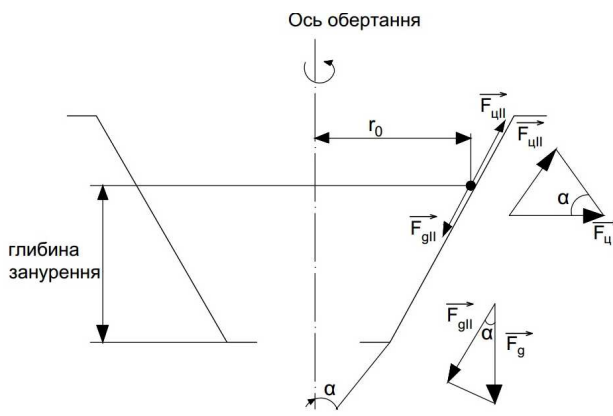


Рис.7 – Схема до аналізу сил, що діють на плівку на поверхні усіченого конуса:

α – напівкут; r_0 – радіус при глибині занурення;

$\vec{F}_{цл}$, $\vec{F}_{г}$ – складові відцентрової та гравітаційної сил, що паралельні поверхні конуса

Таким чином, можна розрахувати критичну кутову швидкість:

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{цл}| &= \rho r_0 \times \omega^2 \times \cos(90 - \alpha) \\ |\vec{F}_{г}| &= \rho g \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{цл}| &= |\vec{F}_{г}| \\ \text{або } \omega_{кр} &= \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{r_0 \cos(90 - \alpha)}} \end{aligned} \quad (4)$$

де $|\vec{F}_{цл}| = \rho r_0 \omega^2$ – відцентрова сила, що впливає на одиницю об'єму;

$|\vec{F}_{г}| = \rho g$ – гравітаційна сила, що діє на одиницю об'єму;

$\vec{F}_{цл}$, $\vec{F}_{г}$ – складові відцентрової та гравітаційної сил, що паралельні поверхні конуса і перпендикулярні окружності конуса у точці розгляду;

r_0 – радіус конуса на глибині занурення;

α – напівкут конуса;

ρ – густина рідини;

ω – кутова швидкість.

За умови, коли відомі глибина занурення конуса і його напівкут, можна обчислити критичну кутову швидкість. Для глибини 5 см r_0 складає близько 8 см. Оскільки напівкут складає 40° , то критичне значення кутової швидкості становитиме 105 хв^{-1} . Досліджуване значення цієї величини складає 160 хв^{-1} . Значну відмінність обчисленого і досліджуваного значення $\omega_{кр}$ можна пояснити розподілом рідини у результаті утворення виру у зоні занурення конуса. Розрахунки числа Рейнольдса вказують на те, що плівка знаходиться у стані ламінарного режиму з хвилястою поверхнею, що добре узгоджується з досліджуваними спіральними хвилями.

Розрахунки з масопереносу доводять, що проста модель, що застосована у аналізі, дає пристойні результати. Значення $K_i \times \alpha$ (10 год^{-1}) є набагато меншими у порівнянні з наведеними для ферментерів з газовою турбіною (400 год^{-1}) [1, 4]. Тим не менше, такі ферментери завжди потребують додавання піногасників і фактичні значення $K_i \times \alpha$ для них є на практиці набагато меншими.

Крім того, випробування конусної конструкції показали, що є три режими масопереносу: плівка, що піднімається по поверхні конуса, плівка, що падає та краплі. Для крапельного режиму слід очікувати найбільшу поверхню контакту одиниці об'єму рідини з газом.

Таким чином, коли змінити геометрію робочого органу так, щоб подовжити крапельний режим і, відповідно, час контакту у крапельному режимі, $K_i \times \alpha$ може бути суттєво збільшено. Ще більше, коли розмістити декілька конусів концентрично, сумарна площа на одиницю об'єму зросте і $K_i \times \alpha$ теж збільшиться пропорційно кількості конусів, що розміщається у певному об'ємі.

Висновки

1. Значення $K_i \times \alpha$ 10 год^{-1} було отримано для енерговитрат, менш ніж $0,2 \text{ kW/m}^3$ для одного конуса апарату, що представлений на рис.1.
2. Загальновідома модель швидкості переносу може бути використана для аналізу переносу кисню.
3. Отримано деякі відмінності, які очікувались через припущення, що концентрація кисню у плівці щільно наближена до концентрації у основному об'ємі. Саме вона вимірювалась кількісно. Таке припущення, однак, правомірне при високій

- відносній розчинності у ємності. При низьких значеннях розчинності воно не правомірне.
- Вивчено характеристики потоку плівки рідини. Встановлено, що при швидкостях обертання до 160 хв⁻¹ безперервна плівка не утворюється. Із зростанням швидкості плівка стає безперервною.
 - Глибина занурення істотно впливає на кутову швидкість, що необхідна для утворення безперервної плівки. З глибиною це значення стає більшим.
 - Результати досліджень з піноутворення доводять, що використана конструкція практично повністю руйнує піну. Ця перевага може використовуватись і мати значний потенціал для багатьох випадків ферментації.
 - Представлені дані справедливі для конуса, що розміщений у відкритій системі. Однак, цю конфігурацію можна використати і у закритих ферментерах.
 - Розміщення декількох конусів концентрично або каскадно може значно підвищити $K_L \times a$ і ефективність конструкції у цілому.

Подальша робота авторів спрямована на оптимізацію конструкції проти ефекту розшарування рідини і оптимізацію енерговитрат біореакторів.

Список літератури

- Бейли, Дж. Основы биохимической инженерии / Дж. Бейли, Д. Оллис // Пер. с англ. В 2-х част. – ч. 2. – М.: Мир. – 1983. – 550 с.
- Подводзинський, В. М. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з пневматичним перемішуванням / В. М. Подводзинський, О. Є. Резенчук, В. Ю. Шибецький // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – №3 – С.79-84.
- Hacking, A. J. Economic aspects of biotechnology / A. J. Hacking // Cambridge university press. – 1996. – 306 p.
- Бекер, М. Е. Биотехнология / М. Е. Бекер, Г. К. Лиепиньш, Е. П. Райпулис. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 334 с.
- Кантере, В. М. Основы проектирования предприятий микробиологической промышленности / В. М. Кантере, М. С. Мосичев, М. И. Дорошенко. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 304 с.
- Roubicek, R. V. Centrifugal film fermentor / R. V. Roubicek, V. Feres // U.S. Patent Application № 06/897350.
- Сидоренко, О. Д. Биологические технологии утилизации отходов животноводства / О. Д. Сидоренко, Е. В. Черданцев. – М.: МСХА, 2001.
- Виестур, У. Э. Системы ферментации / У. Э. Виестур, А. М. Кузнецов, В. В. Савенков. – Рига: Зинатне. – 1986. – 174 с.
- Сычев, А. Е. Импульсные аппараты и перспектива их использования в биотехнологии / А. Е. Сычев, В. А. Сычев, Г. И. Воробьева, А. И. Заикина, Р. А. Рогачева // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Сыктывкар. – 2012. – выпуск 3(11). – С.33-37
- Войнов, Н. А. Улучшение экологичности и повышение эффективности биохимических производств / Н. А. Войнов, Р. А. Степень, С. М. Воронин, Д. В. Буйко // Химия растительного сырья. – 1998. – №1. – С.33-43.
- Сорокіна, К. Б. Технология переробки та утилізації осадів: навч. посібник / К. Б. Сорокіна, С. Б. Козловська // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ. – 2012. – 226 с.
- Качан, Ю. Г. Математическое моделирование процессов в биогазовой установке / Ю. Г. Качан, Ю. В. Курис, И. Н. Левицкая // Профессиональный журнал «Новость Энергетики», г. Киев. – № 5. – 2009. – С. 24-29.
- McCarty, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications / P. L. McCarty. – Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- Garnier, M. Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater pollution caused by agricultural disposal of animal waste / Garnier M. Lo Porto A, Marini R and Leone A // Environmental management. – 1998. – Т. 22. – №. 5. – С. 747-756.

Bibliography (transliterated)

- Beili, Dj., Ollis, D. Osnovi biohimicheskoj ingenerii. Per. s angl. V 2-h chas, 1983, 2, 550 p.
- Podvozninskii, V. M., Resenchuck, O. E., Shibetskii, V. U. Klasifikacia ta analiz roboti fermenteriv z pnevmatichnim peretvorenyam [Classification and analysis of fermenters with pneumatic mixing]. Naukovi visti NTUU «KPI», 2011, 3, 79-84.
- Hacking, A. J. Economic aspects of biotechnology. Cambridge university press, 1996. – 306 p.
- Becker, M. E., Myapinsh, G. K., Raypulis, E. P. Biotechnologia, 1990, 334 p.
- Kantere, V. M., Mosichev, M. S., Doroshenko, V. I. Osnovi proektirovania predpriatii mikrobiologicheskoi promishlenosti [Fundamentals of microbiological industry enterprises], 1990, 304 p.
- Roubicek, R. V, Feres, V. Centrifugal film fermentor. U.S. Patent Application № 06/897350.
- Sidorenko, O. D., Cherdancev, E. V. Biologicheskie tehnologii utilizacii othodov zivotnovodstva [Biological disposal of animal waste technology], Moskow, MCHA, 2001.
- Viestur, U. E., Kuznecov, A. M., Cavenkov, V. V. Sistemi fermentacii [Fermentation System], Riga, 1986, 174 p.
- Sichev, A. E., Sichev, V. A., Vorobieva, G. I., Zaikina, A. I., Rogacheva, R. A. Impulsnie apparati I perspectiva ih ispolzovania v biotehnologii [Switching devices and the prospect of their use in biotechnology]. Izvestia Komi nauchnogo centra UrO RAN, 3(11), 2012, 33-37.
- Voinov, N. A., Stepen, R. A., Voronin, S. M., Buiko, D. V. Uluchenie ekologichnosti I povishenie effektivnosti biohimicheskikh proizvodstv [Improving the environmental performance and efficiency of chemical production]. Himia rastitelnogo siria, 1998, 1, 33-43.
- Sorokina, K. B., Kozlovskaja, S. B. Tehnologija pererobki ta utilizacii osadiv [Technology recycling and disposal of sludge, teach. manual]. Hark. Nac. Akadem. Misk. Hosp, 2012, 226 p.
- Kachan, U. G., Kuris, U. V., Levicka, I. N. Matematicheskoe modelirovanie processov v biogazovoi ustanovke [Mathematical modeling of processes in biogas plant]. Professionalnii zurnal «Novost Energetiki» [Professional magazine "Energy News"], 5, 2009, 24 -29.
- McCarty, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications, Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- Garnier, M., Lo Porto, A, Marini, R., Leone, A. Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater

pollution caused by agricultural disposal of animal waste, Environmental management, 1998, 5(22), 747-756.

Відомості про авторів (About authors)

Бондар Сергій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: sn_bondar@list.ru.

Sergey Bondar – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of ecology and environmental technologies, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: sn_bondar@list.ru

Чабанова Оксана Борисівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: oksana_chabanova17@ukr.net.

Oksana Chabanova – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: oksana_chabanova17@ukr.net.

Трубнікова Анастасія Анатоліївна – аспірант кафедри технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: : sc228004@ukr.net.

Trubnikova Anastasia – postgraduate of department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: sc228004@ukr.net.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

Бондар, С. М. Інтенсифікація біотехнологічного процесу аеробної обробки рідких субстратів / **С. М. Бондар, О. Б. Чабанова, А. А. Трубнікова** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

Please cite this article as:

Bondar, S., Chabanova, O., Trubnikova, A. Intensification of biotechnological aerobic process of treatment of liquid substrates. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 18 (1190), 158-163, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бондарь, С. Н. Интенсификация биотехнологического процесса аэробной обработки жидких субстратов / **С. Н. Бондарь, О. Б. Чабанова, А. А. Трубникова** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

АННОТАЦИЯ Рассмотрено устройство на базе вращающейся конической поверхности для улучшения массообмена между жидкостью и газом. Под действием центробежной силы на поверхности погруженного конуса формируется тонкая пленка жидкости, которая образует значительную площадь контакта пленки и газовой фазы. Установлено, что массообмен между жидкостью и газом в отношении кислорода зависит от скорости вращения конуса и его глубины погружения. Определены удельные энергозатраты процесса. Исследованы характеристики потока пленки на поверхности конуса. Установлено, что с ростом скорости вращения пленка становится непрерывной. Глубина погружения конуса существенно влияет на угловую скорость, необходимую для образования непрерывной пленки. Чем больше погружение, тем большая угловая скорость необходима. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать хороший прогноз для использования конической системы аэрации не только в открытых, но и закрытых ферментерах. Концентрическое расположение конусов вращения значительно повысит эффективность аэрации различных сред, в том числе сточных вод. Приведены данные по пенообразованию для данного варианта устройства по сравнению с традиционным ферментером. Проведен математический анализ основных зависимостей процесса массообмена между жидкостью и газом. Предложена модель, которая адекватно отображает сущность процесса.

Ключевые слова: устройство, аэробная ферментация, жидкие отходы, пенообразование, массообмен, математический анализ

Надійшла (received) 08.05.2016