

УДК 628.3

**ВЛИЯНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ  
БИОРЕАКТОРОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД**

©Постельняк И. Е.<sup>1</sup>, Слепцов Г. В.<sup>2</sup>, Сырников Е. В.<sup>2</sup>

*Українська інженерно-педагогічна академія<sup>1</sup>*

*ТОВ «Науково-виробниче підприємство АОСП-1»<sup>2</sup>*

**Інформація про авторів:**

**Постельняк Інна Євгенівна:** ORCID: 0000-0001-8809-2349; innulyagrab@mail.ru; інженер кафедри охорони праці, стандартизації та сертифікації; Українська інженерно-педагогічна академія; вул. Університетська, 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Слепцов Георгій Володимирович:** ORCID: 0000-0002-0581-0331; georgvs@mail.ru; кандидат технічних наук; старший науковий співробітник; ТОВ «Науково-виробниче підприємство АОСП-1»; вул. Сумська, 77, м. Харків, 61023, Україна.

**Сырников Евгений Владимирович:** ORCID: 0000-0001-8803-2426; syrnikov@list.ru; кандидат фізико-математичних наук; головний інженер; ТОВ «Науково-виробниче підприємство АОСП-1»; вул. Сумська, 77, м. Харків, 61023, Україна.

В работе приведен анализ наиболее распространенных методов очистки сточных вод. Особое внимание уделяется системам биологической очистки и расчету биореакторов-аэротенков. Показано, что рационально проводить процесс очистки сточных вод в реакторах-вытеснителях в условиях процессов первого кинетического порядка. При этом, скорость процесса возрастает, а объем реактора сокращается в 2–4 раза. Небольшие по размерам и эффективные МБР найдут применение на машиностроительных предприятиях не только с целью повышения степени очистки промышленных сточных вод, но и для повторного использования очищенных вод в технологическом водоснабжении. Полученные результаты могут быть использованы на машиностроительных предприятиях при создании бессточных систем водоснабжения. Показана необходимость разработки расчетных программ определения константы скорости биodeградации различных веществ.

**Ключевые слова:** биологическая очистка; промышленные сточные воды; биореактор; скорость очистки; окисление.

**Постельняк І. Є., Слепцов Г. В., Сырников Є. В.** «Вплив кінетичних факторів на ефективність біореакторів для очищення промислових стічних вод»

У роботі наведено аналіз найбільш поширених методів очищення стічних вод. Особлива увага приділяється систем біологічного очищення та розрахунку біореакторів-аеротенків. Показано, що раціонально проводити процес очищення стічних вод в реакторах-витіснювачах в умовах процесів першого кінетичного порядку. При цьому, швидкість процесу зростає, а обсяг реактора скорочується в 2–4 рази. Невеликі за розмірами і ефективні МБР знайдуть застосування на машинобудівельних підприємствах не тільки з метою підвищення ступеня очищення промислових стічних вод, але і для повторного використання очищених вод у технологічному водопостачанні. Отримані результати можуть бути використані на машинобудівельних підприємствах при створенні безстічних систем

водопостачання. Показана необхідність розробки розрахункових програм визначення константи швидкості біодеградації різних речовин.

**Ключові слова:** біологічне очищення; промислові стічні води; біореактор; швидкість очищення; окиснення.

*Postelniak I., Sleptsov G., Syrnikov E.* “The influence of kinetic factors on the efficiency of bioreactors for industrial wastewater treatment”.

The article contains analysis of the most common methods of wastewater treatment. Special attention is paid to biological treatment systems and their calculation. Shows that it is rational to wastewater treatment process in reactors-displacers in terms of first-order kinetics. The speed of the process increases and the volume of the reactor is reduced in 2-4 times the results find application in machine-building enterprises of the inland water systems. Small and efficient use will be at IDB machine-building enterprises not only with a view to increasing industrial wastewater treatment, but also for the reuse of treated water in the water supply. The results obtained can be used in the machine-building enterprises of the inland water systems. Shows the need for a settlement of the biodegradation rate constants of various substances.

**Keywords:** biological treatment; industrial wastewater; bioreactor; speed cleaning; oxidation.

## **1. Постановка задачі**

Очищенные промышленные сточные воды могут быть либо отведены в систему канализации, либо использованы повторно на предприятии, в частности для подпитки оборотной системы водоснабжения [1]. Основные условия для такой возможности – максимальное удаление из воды органических и взвешенных веществ. Во многих случаях имеет значение концентрация растворимых минеральных солей, особенно солей жесткости, а также величина рН. Если удаление органических и взвешенных веществ является обязательным условием повторного использования сточной воды, то содержание солей зависит от вида системы водоснабжения и условий водоснабжения на предприятии.

## **2. Анализ публикаций**

Ранее бурно развивались такие способы и технологии очистки воды, как электрохимические – электрофлотокоагуляция, электроокисление и электровосстановление и др. Однако из-за дефицита электроэнергии и роста ее стоимости интерес к электрохимическим методам очистки воды снизился практически полностью, но, по нашему мнению, эти методы имеют право на существование, хотя бы благодаря их универсальности, управляемости и возможностью полной автоматизации.

Для очистки вод от различных химических веществ, в зависимости от степени их дисперсности, используются различные способы: коагулирование, осаждение в виде нерастворимых соединений, фильтрование, окисление-восстановление, деструкция, биохимическое окисление-деструкция и др. Поэтому, интеллектуальное проектирование, строительство и эксплуатация очистных сооружений систем водоснабжения и водоотведения возможно лишь с учетом фундаментальных законов химической термодинамики, химической кинетики и биохимии.

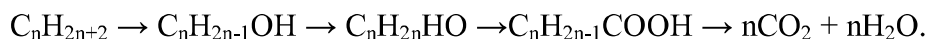
**Технологія машинобудування**

Существует большое число математических моделей очистки воды, основанных на фундаментальных законах. В частности, биологическая очистка сточных вод хорошо описывается так называемой «Моделью активного ила» - ASM 3 [2]. Эту модель используют при проектировании биологических систем.

Модель активного ила ASM 3 способна прогнозировать потребление кислорода, прирост ила, нитрификацию и денитрификацию в системе активного ила, процесс запасания органического субстрата [2]. В этой модели активно используются кинетические характеристики, в частности, константы скорости биологической деградации примесей сточных вод. Однако в распоряжении не всегда имеются все необходимые константы. Поэтому, при использовании этой модели приходится вводить грубые допущения.

Основным критерием при описании биологической очистки сточных вод является ХПК (бихроматная окисляемость). Эта характеристика сточных вод не всегда отражают возможность биологической очистки, и не может характеризовать процесс очистки от отдельных химических веществ. Особенно это ощутимо при использовании математического аппарата формальной химической кинетики при расчете сооружений биологической очистки промышленных сточных вод и технологических параметров процесса очистки. Отсутствие кинетических данных и неправильная оценка степени очистки от конкретных веществ приводит к ошибкам проектирования и к тому, что очистные сооружения иногда не полностью выполняют свои функции.

Биологическая деструкция углеводов, спиртов и альдегидов проходит через определенные стадии окисления, которые приводят к образованию соответствующей карбоксильной кислоты, распадающейся на углекислый газ и воду:



Это означает, что углеводород R ( $C_nH_{2n+2}$ ) вначале может быть окислен до спирта R—OH, затем до альдегида  $RHC=O$ , а далее – до карбоксильной кислоты  $RCOOH$ , и окончательно – до углекислого газа и воды. Аналогичная последовательность может соблюдаться и при биологическом окислении (кислородом воздуха в условиях ферментативного катализа), приводящим к деструкции соединения. Например, окисление аллилового спирта может протекать по схеме:



Основным элементом сооружений биологической очистки сточных вод является биореактор – аэротенк, биотенк, окситенк или МБР (мембранный биологический реактор). В ходе обработки сточных вод в биореакторах происходят превращения примесей сточных вод – окисление или восстановление и биodeградация. Как и любой другой реактор, биореактор, необходимо рассчитать, спроектировать и построить. В данной работе рассмотрены проблемы расчета аэротенков и пути их решения.

В настоящее время разработаны различные способы и программы расчета биореакторов на основе химической и биологической кинетики. Особенно развит подход к биореакторам,

предназначенных для очистки городских сточных вод. Основные показатели сточных вод, учитываемые в расчетах – БПК<sub>5</sub>, содержание взвешенных веществ, ионов группы азота и фосфора, содержание кислорода и активного ила, солесодержание. Однако, как правило, из-за недостаточных экспериментальных данных, разработанные теоретические программы не учитывают кинетику биodeградации примесей, т.е. кинетику очистки сточных вод.

Ранее, показано, что очистка сточных вод от какой-либо примеси может быть описана кинетическим уравнением скорости химической реакции. При этом установлено, что практически все процессы очистки сточных вод от каких-либо примесей относятся к процессам первого порядка [4, 5]. Несмотря на то, что биологическое окисление это бимолекулярный процесс второго порядка, для биологической очистки также применимы законы процесса первого порядка, т.к. концентрация одного из «реагентов» – активного ила, как правило, значительно больше содержания удаляемой примеси и практически не меняется в ходе процесса.

### 3. Выбор уравнения для расчета скорости процесса

Уравнению скорости процесса первого порядка подчиняются такие известные процессы, как очистка сточных вод, радиоактивный распад, растворение вещества, осаждение взвеси, адсорбция вещества на поверхности, скорость роста бактериальной культуры и др. Учитывая, что практически все процессы очистки воды от какого-либо  $i$ -го вещества – процессы первого кинетического порядка, запишем уравнение скорости такого процесса:

$$\vartheta = \frac{dC_i}{dt} = -k_i C_i, \quad (1)$$

Константа скорости равна

$$k_{\text{int}} = -\frac{1}{t} \ln \left( 1 - \frac{C_t}{C_o} \right) \quad (2)$$

где  $\vartheta$  – скорость очистки;  $C_i$  – концентрация  $i$ -го вещества;  $C_o, C_t$  – начальная и конечная концентрация удаляемого вещества ко времени  $t$ ;  $k_i$  – константа скорости  $i$ -го процесса;  $k_{\text{int}}$  – интегральная (общая) константа.

Интегральная константа скорости процесса очистки введена в связи с тем, что практически все процессы являются многостадийными (см. выше), а т.к. контроль процесса ведется по содержанию исходного вещества, например, спирта, то общая константа скорости является интегральной, т.е. учитывающей другие процессы

$$k_{\text{int}} = f(k_1, k_2, \dots, k_i). \quad (3)$$

Уравнение (2) справедливо для реактора полного вытеснения и меняется при переходе к реактору полного смешения [3]:

$$\frac{C_t}{C_o} = \frac{1}{1 + \frac{kV}{Q}}. \quad (4)$$

Учитывая, что среднее время пребывания реакционной смеси в реакторе равно

$$t = \frac{V_R}{Q}, \quad (5)$$

из (2) и (5), получим

$$V_R = -\frac{Q}{k_{\text{int}}} \ln\left(1 - \frac{C_t}{C_o}\right). \quad (6)$$

Таким образом, объем реактора  $V_R$ , необходимый для достижения требуемой степени очистки  $\alpha = C_t / C_o$ , прямо пропорционален  $\ln(1 - \alpha)$  и скорости потока (производительности) очищаемой сточной жидкости  $Q$  и обратно пропорционален константе скорости процесса  $k$ .

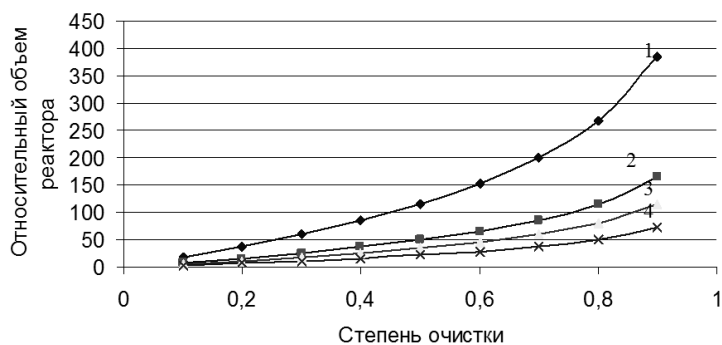
Уравнение (5) свидетельствует о тесной связи между объемом реактора – аэротенка, и константой скорости процесса биологической деструкции вещества, т.е. кинетической характеристикой процесса.

Приведенный выше вывод зависимости (5) объема реактора от константы скорости процесса справедлив для процессов первого порядка и реакторов непрерывного действия полного вытеснения. Для реакторов периодического действия и непрерывного действия идеального (полного) смешения, зависимость будет иной. В работе [3] приведены результаты расчетов  $V_R$  для реакторов различных типов в зависимости от степени протекания процесса. Так, если принять за единицу необходимый объем периодического реактора ( $V_n = 1$ ), то для достижения  $\alpha = 0,5$  непрерывнодействующий реактор полного вытеснения будет иметь объем, равный  $0,91 \cdot V_{Rn}$ , а реактор полного смешения  $1,32 \cdot V_{Rn}$ . Для достижения  $\alpha = 0,9$  объем периодически действующего реактора будет равен  $1,83 \cdot V_{Rn}$ , объемы непрерывно действующих реакторов полного вытеснения и полного смешения будут равны  $1,67 \cdot V_{Rn}$  и  $6,52 \cdot V_{Rn}$ , соответственно. При необходимости достижения  $\alpha = 0,99$ , необходимые объемы рассматриваемых реакторов будут равны  $3,33 \cdot V_{Rn}$ ;  $3,03 \cdot V_{Rn}$ ;  $65,15 \cdot V_{Rn}$ , соответственно.

Таким образом, объем реактора зависит как от кинетического порядка реакции (процесса), так и от типа реакторов. Видно, что наиболее эффективным (по строительному объему) оказывается реактор непрерывного действия полного (идеального) вытеснения для процессов первого порядка. Таким образом, процесс очистки сточных вод желательнее вести так, чтобы кинетический порядок его был равен единице, а конструкция реактора обеспечивала проведение процесса в режиме полного вытеснения.

Используя полученные данные о константе скорости биоокисления спиртов различной молярной массы, рассчитали объемы реакторов (аэротенков), необходимых для проведения очистки сточных вод до заданной степени очистки. В расчетах использовали вычисленные по имеющимся данным биораспада средние значения констант для групп спиртов. Результаты расчетов приведены на рис. 1. Видно, что они верно отражают общие теоретические предпосылки, изложенные выше.

Основные типы биологических реакторов не относятся к реакторам полного вытеснения или полного смешения [5], а являются промежуточным типом. Эту особенность необходимо учитывать в расчетах и при проектировании систем биологической очистки.



**Рис. 1** – Залежність необхідного об'єму аэротенка реактора від ступеня очищення води від спиртів:  
1 – спирти з середньою константою швидкості очищення

$$k_1 = 0,06 \text{ ч}^{-1}; \quad 2 - k_2 = 0,14 \text{ ч}^{-1}; \\ 3 - k_3 = 0,20 \text{ ч}^{-1}; \quad 4 - k_4 = 0,32 \text{ ч}^{-1}$$

отстойниках. Для підвищення ефективності застосовують рецикл активного ила.

Найбільш досконалі та перспективні – МБР – біореактори останнього покоління. В них одночасно відбувається окислювальна біодеструкція органічних речовин та розділення фаз шляхом фільтрування через напівпроникливі ультрафільтраційні мембрани. В цьому реакторі може бути реалізований тип реактора повного витіснення. Крім того, в МБР останнього покоління мембранний блок розташовується всередині аэротенка, завдяки чому вдається підтримувати концентрацію активного ила до 20 г/л. При цьому, швидкість процесу зростає, що дає можливість скоротити об'єм реактора в 2 – 4 рази, збільшити вік ила та знизити об'єм надлишкового ила на 20...50% [5, 7]. Неблизькі за розміром та ефективні МБР знайдуть застосування на машинобудівних підприємствах не тільки з метою підвищення ступеня очищення промислових стічних вод, але й для повторного використання очищених вод в технологічному водопостачанні та створенні безстічних систем водопостачання.

#### 4. Результати дослідження

Встановлено, що швидкість біологічної очищення можна ще більше збільшити, якщо застосувати в процесі технологію синтезу специфічного фермента. Ця технологія починає розвиватися одночасно з розвитком технології МБР [5].

Приведений матеріал свідчить про необхідність урахування кінетики очищення стічних вод, особливо, такого показника, як константа швидкості. В наші часи існує обмежене число даних про швидкість біологічної очищення стічних вод від окремих сполук [6]. Ці дані можна використовувати для розрахунку констант швидкості очищення та розрахунку необхідного об'єму реакторів. Крім того, значення  $k$  необхідно для розрахунку виможаного кількості кисню повітря, подаваного при аэризації стічних вод. Дані про кінетичні характеристики очищення стічних вод від будь-яких сполук, природно, відсутні. Тому, необхідно розробити розрахункову програму визначення  $k_{int}$  для сполук, для яких експериментальні дані відсутні.

В наступних роботах будуть наведені результати розробки розрахункових програм визначення константи швидкості різних речовин, зокрема спиртів.

**Технологія машинобудування****Выводы**

Таким образом, общие тенденции развития биологических методов очистки сточных вод можно сформулировать следующим образом:

- применение биотехнологии на машиностроительных предприятиях для создания бессточных систем водоснабжения;
- разработка расчетных программ определения константы скорости биодegradации различных веществ;
- применение мембранной технологии, позволяющей разделять очищенную сточную жидкость от взвешенных веществ одновременно с биологическим окислением примесей сточных вод;
- применение мембран для увеличения концентрации активного ила, с целью повышения скорости очистки сточных вод в зависимости от их состава;
- производство специфичного фермента для упрощения того или иного процесса [5];
- с целью прогноза качества очищенных вод, управления процессом очистки и расчета аэротенков – разработка кинетической модели процесса биологической очистки сточных вод от индивидуальных веществ.

**Список использованных источников:**

1. Внедрение технологии бессточного замкнутого оборотного водоснабжения на ОАО «Запорожжкокс» / Г. С. Пантелят, Г. В. Слепцов, Е. С. Лисогор, В. Н. Рубчевский // *Водоснабжение и санитарная техника*. – 2000. – № 12, ч. 2. – С. 13–14.
2. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Аршох, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. М. Арван : пер. с англ. – М. : Мир, 2004. – 480 с.
3. Бенедек П. Научные основы химической технологии / П. Бенедек, А. Ласло : пер. с нем. – Л. : Химия, 1970. – 376 с.
4. Слепцов Г. В. Про кінетику електрофлоотокоагуляції синтетичного латексу / Г. В. Слепцов, М. А. Собіна, В. І. Іоненко. – Серія Б 1974. – С. 560–563.
5. Гладкий А. И. Особенности кинетики и механизма разрушения стойких эмульсий типа «масло в воде» при электрокоагуляционной обработке / А. И. Гладкий, Г. В. Слепцов, Е. Я. Сокол // *Электронная обработка материалов*. – 1989. – № 1 (145). – С. 26–29.
6. Технический справочник по обработке воды Дегремон / под ред. М. И. Алексеева, В. Г. Иванова, А. М. Курганова, Г. П. Медведева, Б. Г. Мишукова, Ю. А. Феофанова, Л. И. Цветкова, Н. А. Черникова : пер. с фр. В 2 т. Т. 1, 2. – 2-е изд. – СПб., 2007.
7. Очистка производственных сточных вод в аэротенках / Я. А. Карелин, Д. Д. Жуков, В. Н. Журов, Б. Н. Репин. – М. : Стройиздат, 1973. – 223 с.
8. Мембранно-биологическая очистка сточных вод [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.allbest.ru/>.

**References**

1. Pantelyat, G, Sleptsov, G, Lisogor, E & Rubchevskij, V 2000, 'Vnedrenie tekhnologii besstochnogo zamknutogo oborotnogo vodosnabzheniya na ОАО "Zaporozhzhkoks"', *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, no. 12, ch. 2, pp. 13-14.
2. Khentse, M, Arshokh, P, Lya-Kur-Yansen, Y & Arvan, E 2004, *Ochistka stochnykh vod*, Mir, Moskva.
3. Benedek, P & Laslo, A 1970, *Nauchnye osnovy khimicheskoy tekhnologii*, Khimiya, Lenigrad.
4. Slietsov, H, Sobina, M & Ionenko, B, 1974, *Pro kinetyku elektroflotoko-huliatsii syntetychnoho lateksu*, Seriya B, pp. 560-563.
5. Gladkiy, A, Sleptsov, G & Sokol, E 1989, 'Osobennosti kinetiki i mekhanizma razrusheniya stoykikh emulsiy tipa "maslo v vode" pri elektrokoagulyatsionnoy obrabotke', *Elektronnaya obrabotka materialov*, no. 1 (145), pp. 26-29.
6. Alekseev, M, Ivanov, V, Kurganov, A, Medvedev, G, Mishukov, B, Feofanov, Yu, Tsvetkov, L & Chernikov, N 2007, *Tekhnicheskiiy spravochnik po obrabotke vody Degremon*, 2nd edn, Sankt-Peterburg.
7. Karelin, Ya, Zhukov, D, Zhurov, V & Repin, B 1973, *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkakh*, Sroyizdat, Moskva.
8. Membranno-biologicheskaya ochistka stochnykh vod, <<http://www.allbest.ru>>.

Стаття надійшла до редакції 1 грудня 2014 р.