

чивая как эффективное эмульгирование, растворение и диспергирование при минимальных потерях давления, так и бескавитационную работу струйных эжекторов при необходимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Карелин, В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.
2. Арзуманов, Э.С. Кавитация в местных гидравлических сопротивлениях. – М.: Энергия, 1978. – 308с.
3. Карпенчук И.В., Козлов Д.А. Особенности гидравлического расчета систем, включающих устройства, работающие в кавитационном режиме // Изв. вузов СССР-Энергетика – 1983 – № 7. – С. 106-111.
4. Рабинович, Е.З. Гидравлика. – М.: Недра, 1980 – 276 с.

УДК 628.543

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси)

ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПУЛЬСАЦИОННЫХ БИОРЕАКТОРОВ НА ОБЪЕМНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ МАССОПЕРЕДАЧИ

Одним из важнейших вопросов в решении проблемы перестройки и совершенствования водохозяйственной деятельности молочной промышленности является изыскание наиболее эффективных методов очистки сточных вод, рациональных конструкторских и технологических приемов, обеспечивающих увеличение мощности очистных сооружений, повышение эффективности их работы и качества очищенной воды.

Аэробная биологическая очистка является наиболее эффективным и надежным в санитарном отношении методом очистки сточных вод молокоперерабатывающих предприятий [1]. Анализируя факторы, влияющие на процесс биологической очистки, в [2] был сделан вывод о том, что константа скорости окисления полностью определяется интенсивностью массопередачи и концентрацией субстрата L_0 в начальный момент времени. Интенсифицировать массо-

передачу, а следовательно, и процесс биологической очистки можно при помощи пульсационного биореактора [3].

Изучением массообмена в системе газ - жидкость занимались Городецкий И.Я., Васин А.А., Кафаров В.В., Аэров М.Э., Меньшиков В.А., Трайкина С.С., Винтер А.А., Багачева Э.С., Марченко Ю.Г. и др. Не смотря на это данные по массопередаче в аппаратах предусматривающих воздействие низкочастотных колебаний на систему газ-жидкость очень малочисленны.

Основной задачей выполненных исследований являлось определение конструктивных параметров пульсационного биореактора при которых будет наблюдаться максимальное значение объемного коэффициента массопередачи.

Анализируя информацию, изложенную в [4-9], можно выделить четыре основных параметра, характеризующих работу пульсационного биореактора: n – частота колебания насадки, s – амплитуда колебания, Δ – расстояние между дисками насадки, F_n – полезная площадь дисков насадки.

Исследования, приведенные в [7] показали, что с увеличением частоты колебания насадки возрастает и объемный коэффициент массопередачи. Однако при биологической очистке высокая частота колебания насадки биореактора будет усложнять процессы иммобилизации микроорганизмов на дисках насадки и седиментации избыточной биомассы во вторичном отстойнике, что неблагоприятно будет отражаться на ходе самого процесса очистки. Согласно [10] частота колебаний насадки до 1,3 Гц не влияет на иммобилизационные и седиментационные свойства биомассы, поэтому электропривод пульсационного биореактора подбирали с учетом того, что частота колебания насадки не будет превышать максимального значения 1,3 Гц.

Увеличение расстояния между дисками приводит к падению объемного коэффициента массопередачи [7], поэтому между дисками насадки необходимо устанавливать минимально возможное расстояние. Для того чтобы в процессе биологической очистки исключить зарастание междискового пространства между дисками были установлены муфты шириной 12 мм.

Таким образом, с целью изучения массообменных характеристик пульсационного биореактора была предложена следующая зависимость:

$$\beta_{об} = f(s, F_n), \quad (1)$$

где s – амплитуда колебания насадки, мм;

F_n – полезная площадь дисков насадки, m^2 .

Для определения оптимального режима работы пульсационного биореактора, при котором будет наблюдаться максимальное значение объемного коэффициента массопередачи, была собрана лабораторная установка, изображенная на рисунке 1. Установка состояла из модели пульсационного биореактора с рабочим объемом $0,031 m^3$, бака для сбора воды емкостью $1,12 m^3$, расходного бака емкостью $0,75 m^3$, открытого воздухоотделителя емкостью $0,013 m^3$, насоса К - 45/55 для поддержания постоянного уровня в расходном баке, компрессора УК – 1М для подачи воздуха в пульсационный биореактор и контрольно-измерительных приборов.

Насадка биореактора состояла из набора перфорированных дисков, изготовленных из винипласта, диаметром 200 мм, толщиной 6 мм. Площадь перфорации – 3,84 % площади диска. Возвратно-поступательные колебания частотой 1,3 Гц дисковой насадке биореактора сообщались через кривошипно-шатунный механизм при помощи электропривода (электродвигателя комбинированного с редуктором) ZG2KMRB71K4.

Величину объемного коэффициента массопередачи определяли в соответствии с методикой, приведенной в [4,9], по балансу растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор и выходящей из него.

По средним значениям концентраций растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор C_1 , и в воде выходящей из биореактора C_2 , определяли число единиц переноса $N_{ож}$:

$$N_{ож} = \ln \frac{c^* - c_1}{c^* - c_2}, \quad (2)$$

где C^* – равновесная концентрация кислорода в воде при данной температуре при нормальном давлении воздуха, мг/л.

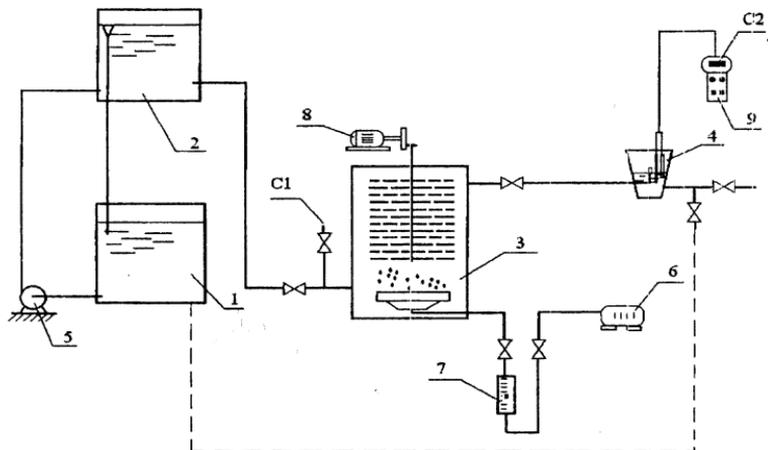


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки по определению объемного коэффициента массопередачи.

1 – бак для сбора воды, 2 – расходный бак, 3 – пульсационный биореактор, 4 – открытый воздухоотделитель, 5 – насос, 6 – компрессор, 7 – ротаметр, 8 – электропривод, 9 – кислородомер

Средняя движущая сила процесса массопередачи:

$$\Delta c_{cp} = \frac{c_2 - c_1}{N_{ож}} \quad (3)$$

Высота единицы переноса (ВЕП)

$$h_{ож} = \frac{H}{N_{ож}}, \quad (4)$$

где H – высота аэрируемого столба жидкости, м.

Объемный коэффициент массопередачи $\beta_{об}$, ч⁻¹:

$$\beta_{об} = \frac{v_{жс}}{h_{ожс}}, \quad (5)$$

где $v_{ж}$ – приведенная скорость движения жидкости в биореакторе, м/час, определяемая

$$v_{жс} = \frac{Q}{F}, \quad (6)$$

где Q – расход жидкости, м³/час; F – площадь поперечного сечения аппарата, м².

С целью сокращения затрат времени и материальных средств на выполнение лабораторных исследований был применен математический метод оптимального планирования эксперимента, позволивший получить математическую (экспериментально-статистическую) модель процесса массопередачи в пульсационном биореакторе.

Под математическим описанием процесса понимается система уравнений, связывающих функцию отклика (величину, качественно характеризующую протекание процесса) с влияющими факторами. Ценность математического описания заключается в том, что оно, во-первых, дает информацию о влиянии факторов, во-вторых, позволяет количественно определить значения функции отклика при любом заданном режиме ведения процесса [11].

Процесс нахождения математической модели включал: планирование эксперимента, проведение эксперимента на объекте исследований; проверку воспроизводимости эксперимента; получение математической модели объекта с проверкой статистической значимости выборочных коэффициентов регрессии; проверку математической адекватности описания.

Для нахождения области оптимума был произведен экспериментальный поиск и затем в оптимальной области осуществлен ротатбельный план второго порядка, при котором факторы варьировались на 5 уровнях, соответствующих значениям кодированных переменных +1; -1; +1,41; -1,41; 0 (ротатбельное центральное композиционное планирование - ЦКП) [11]. На основании априорной информации было установлено, что на эффективность иссле-

дваемого процесса наибольшее влияние оказывают два фактора. Поэтому математическое описание процесса выражается в виде уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2$$

Опыты выполняли в следующей последовательности. В бак (1), заполненный водопроводной водой, добавляли сульфит натрия и хлорид кобальта, предварительно растворенные в теплой воде. Количество добавляемого сульфита натрия определяли исходя из остаточной концентрации растворенного кислорода, не более 1,5 мг/л. Количество хлорида кобальта, играющего роль катализатора в реакции окисления сульфита натрия растворенным кислородом, определяли из расчета г/м³.

После добавления реагентов включили насос (5) на перемешивание, продолжительность перемешивания 1,5 – 2 минуты. Объемным способом установили требуемый расход $Q = 0,0283$ л/с = $0,102$ м³/ч, что соответствовало скорости жидкости $1,921$ м/ч = $0,53 \cdot 10^{-3}$ м/с. Установлено, что в интервале линейных скоростей жидкости $10^{-4} - 10^{-3}$ м/с, имеющих практическое значение для промышленных реакторов, скорость жидкости не влияет на объемный коэффициент массопередачи [7].

Включили подачу воздуха с установленным расходом, расход воздуха определили при помощи ротаметра РС - 5 (7). На протяжении всего эксперимента подача воздуха была неизменной и составляла $Q_{\text{возд}} = 0,58$ л/с.

Затем после 10-минутной работы аппарата с интервалом в 3 минуты фиксировали значение концентрации растворенного кислорода C_2 в воде, в воздухоотделителе (4), который в технологической схеме установлен после биореактора. Значение концентрации растворенного кислорода в воде, поступающей в биореактор, C_1 оставалось на протяжении всего эксперимента неизменным, $C_1 = 0,05$ мг/л. Температуру и концентрацию растворенного кислорода в воде определяли при помощи портативного кислородомера АЖА – 101М (9).

Для вывода уравнения связи функции отклика y (объемный коэффициент массопередачи - $\beta_{\text{об}}$) и независимых входных переменных – факторов X_1 (амплитуда колебания насадки - s , мм), X_2 (по-

лезная площадь насадки – F_n , м²) был применен статистический метод планирования эксперимента по ротатбельному плану полного факторного эксперимента второго порядка.

Для проведения полного факторного эксперимента задавались условиями, приведенными в таблице 1.

Амплитуду колебания насадки пульсационного биореактора изменяли за счет изменения диаметра маховика электропривода, площадь насадки аппарата варьировали, изменяя количество дисков насадки.

Таблица 1 – Условия проведения эксперимента

Характеристика	Амплитуда колебания насадки, мм	Площадь насадки, м ²
Основной уровень	67	0,604
Интервал варьирования	23,4	0,214
Верхний уровень	90,4	0,818
Нижний уровень	43,6	0,390

Перед реализацией плана на объекте варианты варьирования факторов рандомизировались, то есть с помощью таблицы равномерно распределенных случайных чисел определяли последовательность реализации опытов в каждой точке и варианты варьирования факторов. В таблице 2 представлены экспериментальные данные, полученные на основании выполненных в лабораторных условиях исследований.

В таблице 2 приведены “уровни” переменных в каждой серии опытов и экспериментальные значения функции отклика (объемного коэффициента массопередачи), определенные в каждой серии опытов.

В результате статистической обработки экспериментальных данных составлены уравнения регрессии в виде полиномов второй степени в кодированных (8) и физических (9) переменных:

$$y = 13,165 - 0,403X_1 + 1,436X_2 + 0,179X_1 \cdot X_2 - 0,996X_1^2 - 0,177X_2^2, (8)$$

$$\beta_{об} = 2,154 + 0,206s + 8,986F_n + 0,036s \cdot F_n - 0,00184s^2 - 3,865F_n^2. \quad (9)$$

Таблица 2 – Результаты эксперимента, выполненного по матрице ротatableльного ЦКП

Система опытов	№ опыта	Амплитуда колебания насадки (s), мм	Полезная площадь насадки (F_n), м ²	Объемный коэффициент массопередачи ($\beta_{об}$), ч ⁻¹				\bar{y}_p , ч ⁻¹
				y_1^3	y_2^3	y_3^3	\bar{y}_3	
Полный факторный эксперимент	1	43,6	0,390	11,22	11,10	11,13	11,15	11,140
	2	90,4	0,390	10,11	9,98	10,15	10,08	9,970
	3	43,6	0,818	13,58	13,52	13,43	13,51	13,650
	4	90,4	0,818	13,18	13,15	13,12	13,15	13,200
Опыты в звездных точках	5	100	0,604	10,43	10,45	10,35	10,41	10,610
	6	34	0,604	11,63	11,66	11,72	11,67	11,740
	7	67	0,906	14,74	14,76	14,87	14,79	14,840
	8	67	0,302	10,48	10,58	10,50	10,52	10,790
Опыты в центре плана	9	67	0,604	13,25	13,16	13,22	13,21	13,165
	10	67	0,604	13,14	13,06	13,19	13,13	13,165
	11	67	0,604	13,36	13,26	13,34	13,32	13,165
	12	67	0,604	13,14	13,24	13,16	13,18	13,165
	13	67	0,604	12,84	13,12	12,92	12,69	13,165

Условие значимости выполняется для всех коэффициентов, расчетное значение критерия Фишера $F_p = 2,99$ меньше табличного значения $F_{табл} = 6,59$ [11], следовательно, уравнения регрессии (8), (9) адекватно описывают поверхность отклика.

Из графика, приведенного на рисунке 2, видно, что при любом значении площади насадки с ростом амплитуды колебания до $s=70,6$ мм увеличивается и значение объемного коэффициента массопередачи, при дальнейшем увеличении амплитуды происходит его снижение. Исследования же влияния частоты и амплитуды колебания насадки [7, 12] показывают, что с увеличением обеих па-

раметров объемный коэффициент массопередачи возрастает, что, по мнению авторов, связано с дроблением пузырьков при движении насадки. Это противоречие объясняется тем, что в экспериментах, проводимых авторами [7, 12], рассматривались небольшие значения амплитуды колебания. В нашем же случае частота колебания - величина постоянная и, вполне возможно, что при значительном увеличении амплитуды колебания насадки происходит увеличение коалесцентной способности пузырьков воздуха, что способствует снижению коэффициента массопередачи биореактора.

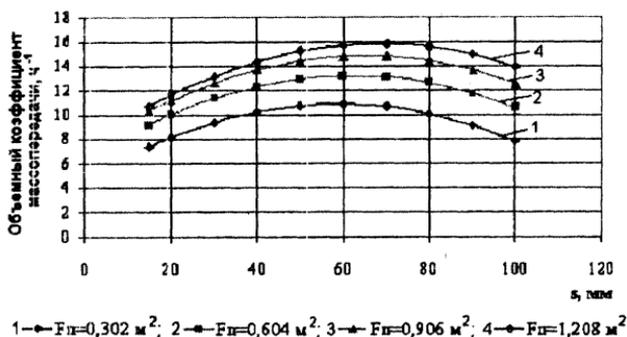


Рисунок 2 – Зависимость объемного коэффициента массопередачи от амплитуды колебания насадки биореактора

Анализируя данные, приведенные на рисунке 3, установили, что значение объемного коэффициента массопередачи увеличивается с ростом полезной площади насадки до 1,5 м², после чего, при дальнейшем увеличении площади происходит его снижение.

Таким образом, в ходе проведения эксперимента по изучению массообменных характеристик пульсационного биореактора было подтверждено, что значение объемного коэффициента массопередачи пульсационного биореактора зависит от его конструктивных параметров. На основании выполненных в лабораторных условиях экспериментальных исследований по оценке массообменных характеристик пульсационного биореактора была получена экспериментально-статистическая модель, иллюстрирующая зависимость объемного коэффициента массопередачи от амплитуды колебания и полезной площади насадки. Также было установлено, что увеличе-

ние объемного коэффициента массопередачи связано с ростом амплитуды колебания до $s = 70,6$ мм и полезной площади насадки до $F_n = 1,5$ м², максимальные значения объемного коэффициента массопередачи наблюдаются в следующих интервалах: $s = 60-80$ мм, $F_n = 1-1,5$ м².

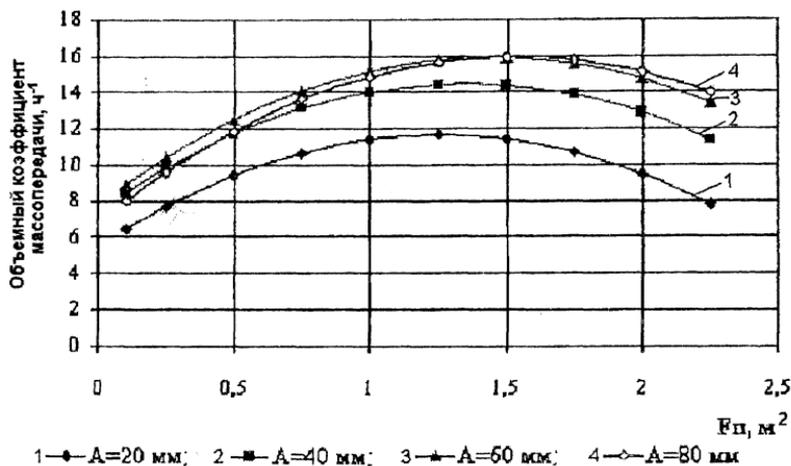


Рисунок 3 – Зависимость объемного коэффициента массопередачи от полезной площади насадки

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковчиц, М.В. Методы и сооружения для очистки производственных сточных вод молокоперерабатывающих предприятий от органических загрязнений / Брестский гос. технич. ун-т. – Брест, 2003. – 20 с. – Деп. В БелИСА 9.06.03 - № Д200342 // Реф. сборник непубликуемых работ № 1 (27).
2. Яромский В.Н., Яковчиц Определение основных параметров биохимической очистки в пульсационных биореакторах. // Вестник Брестского государственного технического университета. Водохозяйственное строительство, теплоэнергетика, экология. 2002. – № 2 (14). – С. 55 – 56.

3. Пат. 810 ВУ, МКИ С 02F 3/10. Устройство для биологической очистки сточных вод / В.Н. Яромский, М.В. М.В. Яковчиц № u20020178; заявл. 17.06.2002; Опубл. 1.11.2002 / Гос. реестр полезн. моделей.
4. Рамм, В.М. Адсорбция газов. Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
5. Кафаров, В.В. Основы массопередачи. М.: Стройиздат, 1962. – 655 с.
6. Марченко, Ю.Г. Методика экспериментальных исследований массообменных характеристик аэраторов // Водоснабжение и санитарная техника. – 2000. – № 12 ч. 1. – 20 с.
7. Аэров, М.Э., Меньшиков, В.А., Трайкина, С.С. ЖПХ, 1967. Т. 40, № Н. – С. 852-863.
8. Винтер, А.А., Багачев, Э.С. Теория и практика перемешивания в жидких средах. М.: НИИТЭхим, 1976. – С. 113-115.
9. Ленский, Б.П., Климухин, В.Д. Массообменные свойства биофильтров с различными нагрузками // Химия и технология воды. № 6, 1992. – С. 469-475.
10. Traitment biologique aerobie: l'apport de l'electricite / Gardais D. // Industrie (fr.). – 1991. – №8 – р. 53 – 55. // РЖ “Химия”, 19И. Общие вопросы химической технологии, №6, М. 1992. – 48 с.
11. Саутин, С.Н. Планирование эксперимента в химии и химической технологии. – Л.: Химия, 1975. – 48 с.
12. Городецкий, И.Я., Васин, А.А. [и др.]. Вибрационные массообменные аппараты. – М.: Химия, 1980. – 188 с.

УДК 628.543

В.Н. Яромский (отдел проблем Полесья НАН Беларуси),
М.В. Яковчиц (БГТУ)

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЛЬСАЦИОННОГО БИОРЕАКТОРА

При расчете сооружений биологической очистки необходимо использовать истинное значение кинетических коэффициентов [1].