

Таблица 3

Стехиометрические, кинетические, физиологические константы и коэффициенты, использованные для описания детоксикации формальдегида путем денитрификации

Показатели	Размерность	Значение
Y_H	г/г	0,3-0,55 [3]
K_S	мг/дм ³	100-130 [3, 6], экспериментальные данные
μ_{Hmax}	сут-1 (ч-1)	2,2-2,4;3,экспериментальные данные
r_{maxd}	мг/г×ч	295, экспериментальные данные
Y_D	г/г	0,9 [3, 6, 7]
K_N	мг/дм ³	25[3, 6, 7]
k_T	сут ⁻¹	0,03
K_{de}	мг БПК/ мг био-массы	0,024
α	сут ⁻¹	0,9
b_1		0,24
η		0,8
арН		6,5; 5,5 9,5; 10,5 [2, 6]
K_{O_2}	мг/дм ³	1,0 [6]

Литература

1. Бахарева А.Ю. Экологически безопасные методы очистки газообразных промышленных выбросов от формальдегида и метана: Дис... канд. техн. наук: 21.06.01 / Бахарева Анна Юрьевна. – Харьков, 2009. – 210 с.
2. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоз, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван / Под ред. М. Хенце. – М.: Мир, 2004. – 480 с.
3. Яковлев В.П. Биохимические процессы в очистке сточных вод / Яковлев В.П., Карюхина Т.А. – М.: Стройиздат, 1980. – 200 с.
4. Сврдликов А.А. Глубокая биологическая очистка сточных вод от соединений азота: Дис... канд. техн. наук: 05.23.04 / Сврдликов Александр Александрович. – М., 1996. – 156 с.
5. Березин И.В. Основы физической химии ферментативного катализа / Березин И.В., Мартинек К. – Учебное пособие. – М.: Высш. школа, 1977. – 280 с.
6. Вавилин В.А. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов / Вавилин В.А., Васильев В.Б., Рытов С.В. – М.: Наука, 1993. – 202 с.
7. Henze M. Activated Sludge Model № 2 / M. Henze, W. Gujer, T. Mino, T. Matsuo, M.C. Wentzel, G.v.R. Marais // Scientific and Technical Report. – London: IAWQ. – 1995. – № 3. – P. 847-861.

Виявлено основні закономірності гідродинаміки пінного шару зі стабілізатором на дрібнодірчастих протитечійних решітках. Розглядаються структурні параметри фаз пінного шару як цільного середовища. Враховується взаємний вплив двох фаз. Вивчено коливання газорідного шару
Ключові слова: пінний шар, стабілізація пінного шару, дрібнодірчасті тарілки

Выявлены основные закономерности гидродинамики пенного слоя со стабилизатором на мелкодырчатых противоточных решетках. Рассматриваются структурные параметры фаз пенного слоя как сплошной среды. Учитывается взаимное влияние двух фаз. Изучены колебания газожидкостного слоя
Ключевые слова: пенный слой, стабилизация пенного слоя, мелкодырчатые тарелки

The basic laws of hydrodynamics of a foam layer with a stabilizer on the small hole antiexact plate are developed. The structural parameters of phases of foamy layer are examined as a continuous environment. Take into account the mutual influence of two phases. The vibrations of gas-liquid layer are studied
Keywords: foamy layer, stabilizing of foamy layer, small hole antiexact plates

УДК 66.074:661

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ПЕННОГО СЛОЯ СО СТАБИЛИЗАТОРОМ

В.Ф. Моисеев

кандидат технических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой Кафедра химической техники и промышленной экологии*

Контактный тел.: (0572) 400-857
 E-mail: himeko@kpi.kharkov.ua

А.Ю. Масикевич

Кандидат технических наук, доцент Кафедра экологии и права

*Национальный технический университет ул. Фрунзе 21, г. Харьков, Украина, 61002
 Контактный тел.: (0572) 400-857
 E-mail: himeko@kpi.kharkov.ua

Скорость гетерогенных процессов массопередачи определяется гидродинамическими условиями взаимодействия и конструкцией применяемого аппарата. Актуально направление, связанное с проведением диффузионных и подобных им процессов в интенсивных режимах развитой турбулентности при больших скоростях потоков газов и жидкостей. Турбулизация газожидкостной (Г–Ж) системы приводит к повышению интенсивности массообменных аппаратов. Одним из методов турбулизации системы газ – жидкость является превращение ее в подвижную нестабильную пену за счет кинетической энергии газа. Пенный режим обработки газов и жидкостей стал передовой идеей в мировой науке химической технологии. Пенный режим и пенные аппараты «классического» типа описаны в работах [1, 2]. Интенсифицированные аппараты со стабилизатором пенного слоя нашли широкое применение для улавливания пыли из газов и для абсорбции газов в химической и смежных отраслях промышленности. Благодаря своей высокой эффективности, большой единичной мощности, хорошим эксплуатационным качествам их применение позволяет усовершенствовать стадии очистки газа в технологических и санитарных целях, увеличить КПД и повысить надежность газоочистного оборудования.

Промышленная реализация метода стабилизации газожидкостного слоя значительно расширяет область применения пенных аппаратов и открывает новые возможности интенсификации технологических процессов с одновременным созданием малоотходных технологий. Конструктивное оформление пенных аппаратов позволяет работать как с перекрестным током газа и жидкости, так и с противотоком. Основным конструктивным элементом пенного аппарата является решетка, которая вместе с находящейся на ней жидкостью (пенной) называется полкой аппарата. По числу полок различают однополочные и многополочные аппараты, а по способу отведения жидкости с решетки аппараты с переливными устройствами и противоточные.

На основании исследований укрупненных моделей пенных аппаратов с решетками, собранными из трубок различного диаметра, был спроектирован опытный образец пенного абсорбера производительностью 12000 м³/ч газа.

Проведение исследований было вызвано необходимостью установления общего характера гидродинамических закономерностей. Для этого использовался феноменологический метод исследования гидродинамических закономерностей пенного слоя.

Пенный слой состоит из газовой и жидкой фаз, каждая из которых рассматривается как сплошная среда. Взаимное влияние двух фаз учитывается введением в уравнение движения силы межфазного взаимодействия.

При малых скоростях газа, которые обычно поддерживаются в барботажных аппаратах, основная масса жидкости находится в зоне барботажа, и количество пены и брызг невелико, между тем, диффузия массы и теплообмен идут интенсивно именно в слое пены, обладающей большой межфазной поверхностью, непрерывно и быстро обновляющейся. Даже при малой высоте пенного слоя по сравнению с высотой зоны барботажа он имеет преобладающее значение. Следовательно, увеличением слоя пены за счет уменьшения

слоя барботажа можно резко интенсифицировать процесс.

При постоянном увеличении скорости газа в свободном сечении аппарата слой пены будет увеличиваться за счет уменьшения слоя барботажа и при определенной скорости газа барботажный слой практически исчезает, превращаясь в слой ячеистой пены. При дальнейшем увеличении скорости газа структура пены меняется – она становится подвижной, превращается в сильно турбулизованную газожидкостную систему. Такая пена представляет собой взвешенный слой жидкости в виде быстро движущихся пленок и струй, хорошо перемешанных с пузырьками и струями газа. При этом добавление каких-либо специальных пенообразователей не требуется. С ростом скорости газа турбулентность пены возрастает, структура пены приобретает вихревой характер.

Высота пенного слоя

Колебания верхней границы пенного слоя на противоточных мелкодырчатых тарелках имеют сложный, быстроизменяющийся во времени характер, и зависят от гидродинамических параметров (скорости газа, плотности орошения) физико-химических свойств системы, а также геометрических характеристик решетки и пенного аппарата. Наиболее сильное влияние на колебания верхнего уровня пенного слоя оказывает скорость газа, увеличение которой приводит к возрастанию амплитуды колебания высоты.

Для изучения поведения колебаний газожидкостного слоя в пенном аппарате проводили многократные фотографирования слоя с последующей обработкой фотографий. Параллельно измеряли электрорезистивными методами высоту пенного слоя и исследовали ее статистические характеристики.

Поведение верхней границы слоя над произвольной точкой решетки можно рассматривать как случайную функцию времени

$$H_i = f_i(\tau) \quad (1)$$

где $i = \bar{1}, \bar{n}$ – определяет координаты точки решетки,

над которой происходит измерение высоты пенного слоя.

Можно представить высоту пенного слоя в виде суммы: статической, но зависящей от времени составляющей и динамической, имеющей функциональную зависимость от времени. При этом нас интересует статическая составляющая, которая есть не что иное, как среднее значение высоты газожидкостного слоя или математическое ожидание случайной величины с плотностью распределения $f(H)$. Дисперсия произвольной величины распределения $f(X)$ будет определять динамическую составляющую.

Таким образом, если известен закон распределения случайной величины X и ее дисперсия, то мы можем однозначно определить математическое ожидание случайной величины X , то есть высоту пенного слоя. Можно считать экспериментально доказанным, что высоту пенного слоя следует рассматривать как

реализацию случайного эргодического стационарного случайного процесса, а это значит

$$\mu_1(\tau) = \mu_2(\tau) = \dots = \mu_n(\tau) = H; \tag{2}$$

$$\sigma_1(\tau) = \sigma_2(\tau) = \dots = \sigma_n(\tau). \tag{3}$$

где $\mu_i(\tau)$ - математическое ожидание случайной величины H и $\sigma_i(\tau)$ ее дисперсия.

Статистическая обработка результатов эксперимента показывает, что функция распределения мгновенных значений высоты пенного слоя $f_1(\tau)$ может быть достаточно точно описана нормальным законом распределения, плотность которого имеет вид:

$$f_1(\tau) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) \tag{4}$$

Если воспользоваться уравнением (4) и результатами определения функции $f(H)$ в двух произвольных точках X_1, X_2 а также считать, что в точке X_1, X_2 известны значения f_1, f_2 соответственно, то для определения высоты слоя получим трансцендентное

$$\mu = x_1 \pm \sqrt{\frac{2(x_1 - x_2)}{\lg(f_1/f_2)} \left(\mu - \frac{x_1 + x_2}{2}\right) \ln f_1 \sqrt{2\pi} \cdot \frac{x_1 - x_2}{\ln(f_1/f_2)} \left(\mu - \frac{x_1 + x_2}{2}\right)^{1/2}}$$

уравнение вида:

$$\tag{5}$$

Знак перед корнем определяется величинами X_1, X_2 . Сложный вид уравнения (5) затрудняет нахождение высоты слоя, поэтому уравнение (4) запишем в интегральной форме:

$$F = \int_{-\infty}^{y(F)} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{S^2}{2}\right) dS \tag{6}$$

и выберем такую систему координат, в которой уравнение (6) будет иметь вид

$$y[F] = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \tag{7}$$

Перепишем уравнение (7) для значения σ_i и, решив полученную систему относительно μ , учитывая (2), получим формулу для определения среднего значения высоты пенного слоя в виде:

$$H = \frac{y(F_1)x_2 - y(F_2)x_1}{y(F_1) - y(F_2)} \tag{8}$$

Значение $x_1, x_2, y(F_1), y(F_2)$ легко находятся из эксперимента с использованием стандартных таблиц для нормального закона распределения.

Таким образом, для определения высоты пенного слоя «двухточечным» методом требуется измерение высоты в двух точках, в то время как по методу разнесенных электродов требуются измерения в 10-15

точках. Это значительно упрощает применение электрорезистивного метода измерения высоты слоя в промышленных аппаратах, где в период испытаний затруднительно предугадать расположение верхнего уровня. Практическая реализация нового метода, определение высоты слоя с использованием уравнения (8) была реализована в промышленном масштабе. В зону предполагаемого колебания верхнего уровня слоя вводят два «разнесенных по высоте» измерительных и один базовый – электроды. С генератора импульсов через «Электролитический ключ» измерительный электрод-жидкость – «опорный электрод» импульсы подаются на счетчик. Коммутатор подключает поочередно в схему один из электродов. Если в процессе эксперимента между измерительным электродом и опорным существует контакт – электрод находится в пенном слое, то счетчик будет регистрировать проходящие импульсы. Время пребывания электродов в жидкости определяются из соотношения:

$$t = \frac{n}{\omega t_b}, \tag{9}$$

где n – число зарегистрированных импульсов, ω – задающая частота генератора, t_b – время выборки.

Время пребывания электрода в жидкости является исходным для определения значения накопленной вероятности: $y(F_1) \cdot t_b$.

На рис. 1 приведены данные измерения верхнего уровня пенного слоя на решетках со стабилизатором пены различными методами.

Видно, что наибольшее различие при измерении H проявляется с увеличением скорости газа, так как создается «видимое» увеличение высоты слоя, что фиксируется при визуальных замерах, которые не учитывают провалы уровня слоя.

Различия кривых 2 и 3 незначительно, это: по-видимому, можно объяснить некоторыми отклонениями от нормального закона распределения колебаний верхнего уровня слоя. Разница определения высоты слоя по методу 2 и 3 сохраняется в пределах 5–7%, до скоростей газа 4,5 м/с, когда амплитуда колебаний достигает максимальных значений, что подтверждает высокую надежность метода. Таким образом, «двухточечный» метод, обладающий всеми достоинствами электрорезистивных методов, и его следует рекомендовать для промышленного использования, как простой и точный способ определения H в любых условиях. На основании обработки экспериментальных данных, полученных в пенном аппарате со стабилизатором пенного слоя, при изменении $W_r=1,5-4,5$ м/с, $L_0=1-20$ м³/м²×ч, $S_0=0,15-0,20$ м²/м², $d=3-8$ мм установлена функциональная зависимость вида

$$H = 1,68 W_r^{0,75} \cdot L_0^{0,25} \cdot S_0^{-1,65} \cdot d_0^{-0,14} \cdot \rho_{ж}^{-1} \tag{10}$$

Погрешность измерения высоты слоя по формуле (10) не превышает 12%.

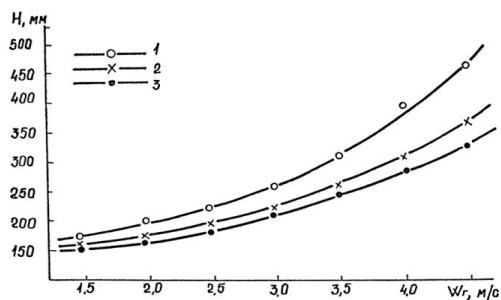


Рис. 1. Высота пенного слоя в зависимости от скорости газа, определенная различными методами: 1 – визуальный, 2 – двухточечный, 3 – с разнесенными электродами. Система вода-воздух. $S_0=0,166 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0=5 \text{ мм}$, $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$

Высота исходного слоя жидкости

Количество жидкости, находящейся в реакционном объеме, определяет гидравлическое сопротивление газожидкостного слоя, его высоту и другие показатели работы пенного аппарата. Известно, что высота исходного слоя жидкости непрерывно изменяется во времени, причем, характер колебаний зависит от многих параметров и прежде всего от N . В данной работе определение запаса жидкости производилась как прямыми измерениями по методу «отсечки», так и по известной формуле:

$$h_0 = H(1 - \phi_r) \tag{11}$$

В результате получали средние значения высоты исходного слоя h_0 .

Высоту пенного слоя находили «двухточечным» методом, а газосодержание - по методу «брошенных» точек. Полученные значения h_0 по методу «отсечки» по формуле (11) с использованием статистических методов (рис. 2) отличаются особенно сильно при высокой скорости газа. Эта разница обусловлена тем, что часть жидкости, находящейся в зоне брызг, на стенках стабилизатора и аппарата, не учитывалась при определении статистическим методом.

Подобные измерения с использованием двух методов позволяют, хотя и не полностью, учесть ту часть жидкости, которая находится в виде брызг. Таким образом, можно сказать, что подобные измерения взаимно дополняют друг друга. В то же время, для оценки количества жидкости, идущей на образование именно пенного слоя, более точен статистический метод.

Наличие стабилизатора пенного слоя приводит к значительному накоплению жидкости в аппарате, особенно заметному при большой плотности орошения $L_0 > 10 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$. На рис. 3 показано, как изменяется величина запаса при наличии стабилизатора пенного слоя и без него.

Установлено, что наиболее сильное влияние на величину h_0 на противоточных решетках без стабилизатора оказывают скорость газа, плотность орошения, свободное сечение решетки и диаметр отверстий.

$$h_0 = f(W_r, L_0, S_0, d_0) \tag{12}$$

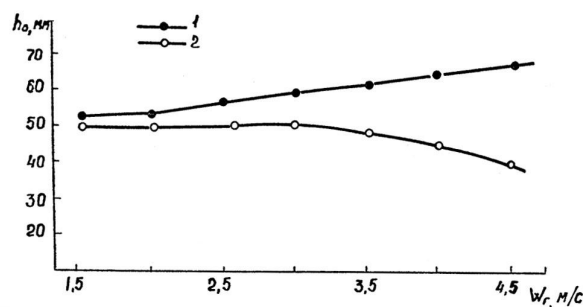


Рис. 2. Зависимость запаса жидкости от скорости газа, полученная по методу отсечки (1) и (2) с использованием формулы (11) $S_0=0,166 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0=5 \text{ мм}$, $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$

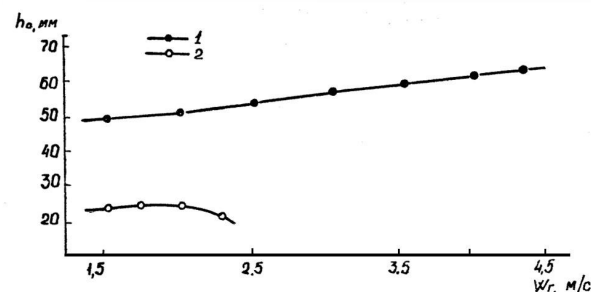


Рис. 3. Зависимость запаса жидкости от скорости газа, на дырчатой решетке: 1 – со стабилизатором пенного слоя; 2 – без стабилизатора; Система воздух вода. $S_0=0,166 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0=5 \text{ мм}$, $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$

Влияние скорости газа при работе со стабилизатором пены можно проследить по (рис. 2, 3). Для дырчатой решетки запас жидкости с ростом скорости газа увеличивается.

Вторым, после скорости газа фактором, оказывающим наиболее сильное влияние на h_0 , является плотность орошения, которая равна пропускной способности противоточной решетки. Результаты опытов по определению зависимости высоты исходного слоя жидкости при различной плотности орошения представлены на рис. 4.

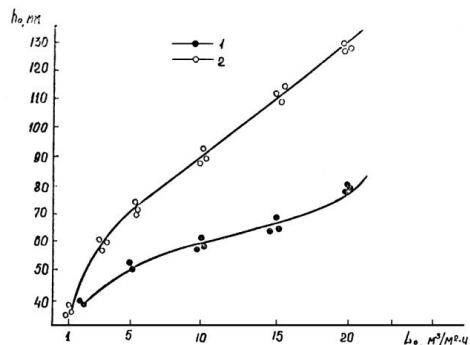


Рис. 4. Зависимость высоты исходного слоя от плотности орошения. Система воздух вода. I – $S_0 = 0,16 \text{ м}^2/\text{м}^2$, II – $S_0 = 0,15 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0 = 5 \text{ мм}$, $W_r = 3,5 \text{ м}/\text{с}$

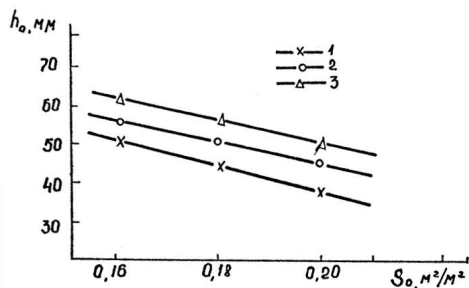


Рис. 5. Зависимость запаса жидкости от свободного сечения решеток Система воздух вода. $L_0=5 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$, 1 – $W_r=1,5 \text{ м/с}$; 2 – $W_r=2,5 \text{ м/с}$; 3 – $W_r=3,5 \text{ м/с}$

Увеличение плотности орошения приводит к росту высоты исходного слоя жидкости. Увеличение свободного сечения решетки при постоянном размере отверстий и неизменных W_r и L_0 приводит к снижению запаса жидкости рис. 5.

Очевидно, что увеличение S_0 приводит к снижению скорости газа в отверстиях решетки, увеличивая тем самым, пропускную способность решетки, и, как следствие - уменьшению h_0 . В зависимости от плотности орошения, скорости газа и свободного сечения решетки, состояние и подвижность газожидкостного слоя меняются. При малой плотности орошения $L_0=1-3 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$ интенсивные поперечные перемещения наступают при скорости 2-2,5 м/с и продолжают увеличиваться с увеличением скорости газа. Препятствуют возникновению колебаний увеличение плотности орошения до $10-15 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$ и выше. Так при большой плотности орошения поперечные колебания почти исчезают и появляются продольные колебания, которые, в свою очередь, вызывают провал жидкости периодически через некоторые промежутки времени. Увеличение запаса жидкости при наличии стабилизатора можно объяснить следующими причинами:

- Тангенциальная составляющая скорости жидкости уменьшается до нуля на стенке, что приводит к «налипанию» жидкости.

- «Гашение» предельных колебаний (суперпозиция волн).

Продольные колебания, возникающие на противоточной решетке, увеличивают h_0 . На одних участках, способствуя провалу жидкости, и оголяют другие, через которые проходит газ и обеспечивают, тем самым,

работу аппарата при малом запасе жидкости. Наличие стабилизатора препятствует продольным колебаниям и поэтому для обеспечения той же пропускной способности решетки требуется увеличение запаса жидкости.

Физические параметры на величину запаса жидкости не оказывают существенного влияния.

Экспериментальные данные были обработаны на ЭВМ с использованием функциональной зависимости

$$h_0 = 0,8 W_r^{0,25} \cdot L_0^{0,25} \cdot S_0^{-1,65} \cdot d_0^{-0,14} \cdot \rho_s^{-2} \quad (13)$$

Уравнение получено для следующих пределов изменения параметров: $W_r=1,5-4,5 \text{ м/с}$, $L_0=1-20 \text{ м}^3/\text{м}^2 \times \text{ч}$, $S_0=0,16-0,20 \text{ м}^2/\text{м}^2$, $d_0=3-7 \text{ мм}$.

Точность измерения h_0 по зависимости 13 не ниже 91%.

С целью разработки теории и практики процессов обработки газов и жидкостей в стабилизированном пенном слое автором проведены многочисленные длительные исследования на лабораторных, полужаводских и промышленных аппаратах ПАСС. Эти исследования позволили установить теоретические основы турбулизации газожидкостных систем, методы и принципы моделирования ПАСС, гидродинамические и кинетические закономерности их работы. Выявлены оптимальные режимы работы ПАСС для условий многих промышленных процессов, разработаны методы расчета и конструирования, создан унифицированный ряд типоразмеров ПАСС, накоплен необходимый опыт их промышленной эксплуатации. Установленные теоретические закономерности имеют значение также для развития научных основ других способов интенсификации процессов в газожидкостных системах путем их турбулизации.

Применение новых ПАСС позволяет коренным образом с минимальными затратами реконструировать технологические схемы очистки отходящих газов в химической и других отраслях промышленности с целью придания им лучших эксплуатационных и технологических характеристик с одновременным увеличением эффективности.

Высокая интенсивность и большая единичная мощность агрегатов ПАСС на разных стадиях абсорбционных процессов позволяют подойти к усовершенствованию технологической схемы конкретного производства.

Литература

1. Мухленов И.П., Пенный режим и пенные аппараты [Текст] / Мухленов И.П., Тарат Э.Я. М.: Химия, 1977.
2. Тарат Э.Я., Интенсивные колонные аппараты для обработки газов жидкостями [Текст] / Тарат Э.Я., Балабеков О.С., Болгов Н.П. Л., Изд. ЛГУ, 1976.
3. Мухленов И.П., Абсорбция и пылеулавливание в производстве минеральных удобрений [Текст] / Мухленов И.П., Ковалев О.С. М.: Химия, 1987.
4. Микулин Г.И., Дистилляция в производстве соды [Текст] / Микулин Г.И., Поляков И.К. М.: Госхимиздат, 1956.
5. Ткач Г.А., Производство соды по малоотходной технологии [Текст] / Ткач Г.А., Шапорев В.П., Титов В.М. Харьков: ХГПУ, 1998.
6. Товажнянский Л.Л., Интенсивные аппараты со стабилизированным слоем пены для очистки отходящих газов [Текст] / Товажнянский Л.Л., Моисеев В.Ф. Харьков: НТУ «ХПИ», 2003