

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ СССР

---

ИЗВЕСТИЯ  
ВЫСШИХ  
УЧЕБНЫХ  
ЗАВЕДЕНИЙ

# ПИЩЕВАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

---

Издается с 1957 г.

4 (161) • 1984

Выходит 6 раз в год

---

## Редакционная коллегия

Главный редактор В. Г. Щербаков

А. Абдурахимов, С. П. Авакянц, М. П. Асмаев, В. В. Баль,  
А. С. Большаков, М. А. Гришин, М. И. Даишев (зам. гл. редактора),  
Л. И. Джумагулова, В. Н. Иванец, Е. Д. Казаков, И. Т. Кретов,  
Г. В. Кружков, Н. Н. Липатов, А. М. Маслов, А. П. Николаев,  
И. К. Петров, Т. Н. Прудникова (зам. гл. редактора), Л. И. Пучкова,  
В. Д. Сурков, П. С. Цыганков, И. Г. Чумак

Отв. секретарь В. Н. Штатский

---

Краснодар 1984

СОДЕРЖАНИЕ

	С.
<b>Экономика и организация производства</b>	
В. П. Долгов, И. И. Голотина, О. Б. Касперская. Использование алгебраической средней при расчете темпов роста объема продукции . . . . .	5
<b>Химия пищевых продуктов и материалов</b>	
Т. Р. Шамелашвили, З. В. Чмелева. Содержание аминокислот в творожных кондитерских изделиях при добавлении пищевых полиолов . . . . .	9
В. Г. Щербаков, Н. К. Артемьева, С. Б. Иваницкий, А. Д. Минакова. Качественные характеристики белкового комплекса семян подсолнечника . . . . .	13
Р. В. Кудашова, Н. А. Монина. Влияние катионного состава фуруцелларана на его термическую стабильность . . . . .	16
А. И. Сомова, В. А. Шеенсон, Е. Н. Губенкова, Л. И. Хомутов, Л. Л. Севьяни. Термические свойства пектина . . . . .	19
Т. Л. Парфентьева, Л. Д. Пуш, Т. Б. Мальчикова. Термодинамика растворения тартрата кальция в водно-этанольном растворителе . . . . .	23
<b>Технология</b>	
Б. А. Николаев, С. С. Шкадина, Н. С. Беркутова, А. В. Малышева. Влияние минеральных удобрений на хлебопекарные качества пшеницы и упруго-пластичные свойства мучного теста . . . . .	28
С. Я. Корячкина, В. С. Баранов, Р. З. Шакирова. Влияние морковного пюре на качество хлеба, свойства теста и его компонентов . . . . .	31
В. Е. Селягин, Л. С. Энкина, Н. Н. Фихтенгольц, Е. Н. Мартынова. Выпечка хлеба в электромагнитном поле СВЧ . . . . .	34
М. К. Мавлянова, Ю. Г. Костенко, Н. Т. Смольский, В. И. Криштафович. Консервирующие свойства аммиачно-солевого раствора . . . . .	38
Н. А. Жеребцов, Л. В. Спивакова, Ю. А. Дуденков, Л. Г. Кириллова. Термокальцевая коагуляция белков обезжиренного молока . . . . .	41
А. Е. Мелетьев, А. Н. Проценко, П. П. Бидзюра. Влияние степени измельчения ячменя и солода на их технохимические показатели . . . . .	44
Н. М. Агеева, А. А. Мержаниан, Э. М. Соболев. Сорбция микроорганизмов вина дисперсными минералами . . . . .	46
<b>Процессы и аппараты</b>	
К. К. Полянский, А. Г. Шестов. Математическое моделирование кристаллизации лактозы в технологии молочных продуктов . . . . .	50
Е. Н. Константинов, Г. Ц. Аветисян, И. М. Василюк. Фазовые сопротивления переносу тепла и массы при окончательной дистилляции масляных мисцелл . . . . .	54
В. П. Корячкин. Влияние температуры на пластичные свойства конфетных масс . . . . .	58
В. Г. Юрчак, В. Д. Кишенько, А. В. Афанасьева, И. Н. Семяновская, Е. Н. Пивень, И. М. Ройтер. Оценка эффективности управляющих воздействий процесса приготовления теста . . . . .	60
П. П. Любченков. Диффузный массоперенос в гетерогенных системах . . . . .	63
П. П. Лобода, Ю. В. Карлаш. Влияние крупномасштабного перемешивания на скорость сорбции труднорастворимых газов . . . . .	68
<b>Технологическое оборудование и автоматизация</b>	
В. И. Соколов, Н. В. Соколов. Определение производительности сепараторов и осадительных центрифуг по заданной степени разделения . . . . .	73
Н. Г. Фомин. Статическая оптимизация процесса ректификации . . . . .	79
<b>Методы исследования и контроль производства</b>	
М. М. Благовещенская, И. К. Петров. Комплексная оценка качества хлебопекарного теста . . . . .	83
Г. Ф. Козлов, Г. Ф. Пшенишнюк, А. М. Бражник. Использование регистрирующих динамических устройств для оценки качества муки и теста . . . . .	86
Салам Мухамед Ратеб, С. И. Петров. Определение микроэлементов в пищевых продуктах . . . . .	89
Я. И. Турьян, О. Е. Рувинский, Л. М. Макарова, Е. Ю. Троц, Е. О. Герасименко. рН-метрическое определение титруемой кислотности в сырье и продуктах винодельческой промышленности . . . . .	92
Ю. А. Клячко, М. А. Шнайдер, Э. В. Каменская, Д. А. Топчиев, М. Л. Коршунова. Аналитический метод контроля следовых количеств флокулянтов в винах и коньяках . . . . .	95

## ВЛИЯНИЕ КРУПНОМАСШТАБНОГО ПЕРЕМЕШИВАНИЯ НА СКОРОСТЬ СОРБЦИИ ТРУДНОРАСТВОРИМЫХ ГАЗОВ

П. П. ЛОБОДА, Ю. В. КАРЛАШ

Киевский ордена Трудового Красного Знамени технологический институт  
пищевой промышленности

Эффективное использование энергии возможно лишь при вполне определенном для каждого технологического процесса распределении ее по уровням перемешивания.

Для интенсификации тепло- и массообмена чаще всего требуется интенсивное перемешивание на микроуровне, создающее большие напряжения сдвига, а интенсивность крупномасштабного перемешивания (на макроуровне) не лимитирует процесс.

Особая задача возникает при сорбции труднорастворимых газов, например, кислорода в микробиологических процессах пищевых производств или углекислого газа при очистке сока (сатурации) в сахарной промышленности. Задача усложняется при высокой скорости потребления растворенного газа и создании аппаратов большой единичной мощности.

При концентрированном вводе энергии с помощью механического перемешивающего устройства в аппарате можно выделить две зоны: 1 — зону мешалки и 2 — периферийную зону, включающую весь остаточный объем аппарата. В 1-й зоне преобладает перемешивание на микроуровне вихрями малого масштаба с большим градиентом скорости, а во 2-й — крупномасштабное перемешивание вихрями большого масштаба, соизмеримыми с размерами мешалки и циркуляционными потоками.

При перемешивании турбинными и вибрационными мешалками можно с достаточной точностью принять, что интенсификация процесса сорбции происходит в зоне мешалки, где диссипирует энергия образующихся турбулентных вихрей (кроме крупномасштабных) и достигается высокий уровень объемного коэффициента сорбции  $K_m$ , а скорость сорбции в периферийной зоне характеризуется объемным коэффициентом сорбции при обычном барботаже  $K_G$ . Крупномасштабные вихри переносят растворенный газ из зоны мешалки в окружающий объем, выравнивая его концентрацию. Такое крупномасштабное перемешивание характеризуется коэффициентом перемешивания  $K_n = \frac{Q}{V}$ , где  $Q$  — расход перемещаемой среды;  $V$  — перемешиваемый объем.

При вводе газового потока в 1-ю зону, из которой он переходит во 2-ю зону, полном перемешивании в зонах и равномерном потреблении растворенного газа в объеме аппарата  $I_V$  скорость изменения концентрации растворенного газа составит в 1-й зоне

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_1 = K_m(C_p - C_1) - K_{n1}(C_1 - C_2) - I_V \quad (1)$$

и во 2-й зоне

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_2 = K_6(C_p - C_2) + K_{n2}(C_1 - C_2) - I_V, \quad (2)$$

где  $C_p$  — равновесная концентрация растворенного газа;

$C_1$  и  $C_2$  — концентрация растворенного газа в 1-й и 2-й зоне;

$K_{n1} = \frac{Q}{V_1}$ ,  $K_{n2} = \frac{Q}{V_2}$  — коэффициенты перемешивания, отнесен-

ные к объему 1-й  $V_1$  и 2-й зоны  $V_2$ ;

$I_V$  — количество растворенного газа, потребляемое в единице объема за единицу времени;

$t$  — время.

Через некоторое время после подачи газа в аппарате устанавливается стационарный массообмен:

$$\left(\frac{dC}{dt}\right)_1 = \left(\frac{dC}{dt}\right)_2 = 0, \quad (3)$$

причем  $C_p > C_1 > C_2$ .

Поток массы растворенного газа, передаваемый из 1-й зоны во 2-ю, в соответствии с уравнениями (1)–(3), равен

$$\begin{aligned} M &= K_m(C_p - C_1)V_1 - I_V V_1 = I_V V_2 - K_6(C_p - C_2)V_2 = \\ &= K_{n1}(C_1 - C_2)V_1 = K_{n2}(C_1 - C_2)V_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Разделив равенство (4) на  $V_1$  и представив  $I_V$  в виде

$$I_V = \frac{I_V}{(C_p - C_1)}(C_p - C_1) = \frac{I_V}{(C_p - C_2)}(C_p - C_2),$$

получим

$$\begin{aligned} \left(K_m - \frac{I_V}{C_p - C_1}\right)(C_p - C_1) &= \left(\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_6\right)(C_p - C_2) \frac{V_2}{V_1} = \\ &= K_{n1}(C_1 - C_2), \end{aligned} \quad (5)$$

откуда следует, что

$$\frac{1}{\left(\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_6\right) \frac{V_2}{V_1}} = \frac{1}{K_m - \frac{I_V}{C_p - C_1}} + \frac{1}{K_{n1}}. \quad (6)$$

При интенсивном крупномасштабном перемешивании  $K_{n1} \gg K_m$ ,  $C_1 \rightarrow C_2$  и уравнение (6) преобразуется

$$K_6 V_2 + K_{m0} V_1 = \frac{I_V (V_1 + V_2)}{C_p + C_2}. \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует, что при интенсивном крупномасштабном перемешивании требуемый уровень  $I_V$  может быть обеспечен как за счет интенсивного перемешивания на микроуровне в зоне мешалки, так и барботажного перемешивания в периферийной зоне. Величина  $C_p$  зависит от давления и при атмосферных условиях очень низкая (для труднорастворимых газов). Объемный коэффициент сорбции при барботаже хотя и растет с увеличением приведенной скорости газа, однако, ввиду усиливающейся коалесценции пузырьков, не высок, например, при абсорбции кислорода в воде он не превосходит  $0,1 \text{ с}^{-1}$ . Поэтому для значительного увеличения  $I_V$  одной лишь барботажной аэрации недостаточно и необходимо дополнительное введение энергии перемешивания для ускорения сорбции.

При снижении интенсивности крупномасштабного перемешивания

эффективность перемешивания уменьшается, так как  $C_1$  становится больше  $C_2$  и движущая сила сорбции в зоне мешалки снижается:

$$(C_p - C_1) < (C_p - C_2).$$

Для обеспечения заданной интенсивности потребления необходимо сохранить поток массы газа, растворяющегося в зоне мешалки, что может быть достигнуто путем увеличения объемного коэффициента сорбции до значения  $K_m$  согласно равенству

$$K_m(C_p - C_1) = K_{m0}(C_p - C_2),$$

откуда коэффициент эффективности перемешивания

$$\eta = \frac{K_{m0}}{K_m} = \frac{C_p - C_1}{C_p - C_2}. \quad (8)$$

Решая совместно уравнения (6), (7), (8), получим:

$$\eta = 1 - \frac{\left(\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_\delta\right) \frac{V_2}{V_1}}{K_{n1}} = 1 - \frac{\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_\delta}{K_{n2}}. \quad (9)$$

При  $K_{n1} \gg \left(\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_\delta\right) \frac{V_2}{V_1}$   $\eta \approx 1$  и уравнение (9) трансформируется в уравнение (7). При критическом уровне крупномасштабного перемешивания

$$(K_{n1})_{кр} = (K_{n2})_{кр} \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{I_V}{C_p - C_2} - K_\delta\right) \frac{V_2}{V_1}, \quad \eta \rightarrow 0, \quad C_1 \rightarrow C_2,$$

$K_m \gg K_{n1}$  и скорость потребления полностью контролируется интенсивностью крупномасштабного перемешивания.

Для эффективного использования интенсивного перемешивания на микроуровне коэффициент крупномасштабного перемешивания должен быть значительно больше критической величины  $(K_n)_{кр}$ . Например, при аэробном культивировании микроорганизмов на концентрированных питательных средах  $\frac{I_V}{C_p - C_2}$  достигает  $0,2 \div 0,3 \text{ с}^{-1}$ , а  $K_\delta$

не превышает  $0,03 \div 0,05 \text{ с}^{-1}$  [1]. В аппарате с соотношением объемов зон  $\frac{V_2}{V_1} = 4$   $(K_{n1})_{кр} = (0,3 - 0,05)4 = 1 \text{ с}^{-1}$  и лишь при  $K_{n1} =$

$= 5 \text{ с}^{-1}$   $\eta = 0,8$ . С уменьшением  $K_n$  эффективность перемешивания снижается, а массообменные возможности аппарата, определенные без учета крупномасштабного перемешивания, будут завышенными и реализуются лишь частично. Так как  $K_m$  и  $K_n$  зависят от энергии перемешивания соответственно на микро- и макроуровне, а, изменяя конструкцию и режим работы перемешивающего устройства, можно управлять ими, уравнение (9) позволяет выбрать наименее энергоемкую конструкцию при заданных технологических условиях, определяемых величиной  $I_V$ .

С увеличением  $C_p$  и уменьшением  $I_V$  критический уровень крупномасштабного перемешивания в большей степени определяется перемешиванием на микроуровне.

Величина  $K_n$  может быть определена на основе уравнений (1), (2), которые при  $I_V = 0$  описывают нестационарный массообмен насыщения среды газом.

Представив скорости изменения концентрации растворенного газа в виде  $\left(\frac{dC}{dt}\right)_1 = K_{V_1}(C_p - C_1)$ ;  $\left(\frac{dC}{dt}\right)_2 = K_{V_2}(C_p - C_2)$ , уравнения (1), (2) можно трансформировать в равенство, аналогичное уравнению (5):

$$\begin{aligned} (K_m - K_{V_1})(C_p - C_1) &= (K_{V_2} - K_b) \frac{V_2}{V_1} (C_p - C_2) = K_{n1} (C_1 - C_2) = \\ &= K_{n2} \frac{V_2}{V_1} (C_1 - C_2), \end{aligned} \quad (10)$$

из которого определяется коэффициент перемешивания:

$$K_{n1} = K_{n2} \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{\frac{1}{(K_{V_2} - K_b) \frac{V_2}{V_1}} - \frac{1}{K_m - K_{V_1}}}, \quad (11)$$

где  $K_{V_1}$  и  $K_{V_2}$  — объемные коэффициенты насыщения среды газом в зонах  $V_1$  и  $V_2$ .

Величины  $K_{V_1}$  и  $K_{V_2}$  находятся по экспериментальным кинетическим кривым насыщения газом в зоне мешалки и периферийной зоне, а  $K_m$  — по аналогичной кривой на модели объемом  $V_1$ , включающей основную зону перемешивания на микроуровне.

Величина  $K_n$  может быть определена также на основе измерения одновременно в обеих зонах концентрации индикатора (щелочи, кислоты, соли), непрерывно вводимого в зону мешалки, с помощью зависимости, вытекающей из уравнения (2) при  $l_v=0$  и отсутствии источников в периферийной зоне:  $\frac{dC_2}{dt} = K_{n2} (C_1 - C_2)$ . (12)

Экспериментальная проверка предложенных зависимостей проводилась в аппарате диаметром 0,5 м с виброперемешивающим устройством в виде поперечной перфорированной пластины, совершающей колебания с амплитудой 0,005 м. Пластина перфорирована отверстиями диаметром  $4,9 \cdot 10^{-3}$  м и имеет свободное сечение 14%. Исследовался процесс абсорбции кислорода воздуха водой при 293 К. Экспериментальные данные, полученные при различных приведенных (к поперечному сечению аппарата) скоростях газа  $w_{np}$ , частотах колебаний виброперемешивающего устройства  $f$  и объемах жидкости  $V_{ж}$ , приведены в таблице.

Таблица

$w_{np}$ м/с	$f$ Гц	$V_{ж}$ $\times 10^3, м^3$	$V_1$ $м^3$	$K_{V_1}$	$K_{V_2}$	$c^{-1}$			
						$K_m$	$K_b$	$K_{n2}$	$(K_{n2})_u$
0,050	23,3	145	60	0,0984	0,0983	0,1915	0,0635	0,0741	0,0727
0,050	23,3	315	60	0,0640	0,0637	0,1915	0,0535	0,0154	0,0159
0,038	23,3	315	50	0,0468	0,0466	0,1811	0,0375	0,0141	0,0144
0,010	16,7	315	50	0,0153	0,0149	0,0703	0,0108	0,0067	0,0062

Сравнение величин  $K_{n2}$ , рассчитанных по уравнению (11) при насыщении воды кислородом воздуха, с величинами  $(K_{n2})_u$ , определенными с помощью индикатора по уравнению (12), свидетельствуют о возможности использования обоих методов при относительной погрешности, не превышающей  $\pm 15\%$ .

**ВЫВОДЫ**

1. При интенсификации сорбции труднорастворимых газов эффективность перемешивания на микроуровне зависит от интенсивности крупномасштабного перемешивания.

2. Критический уровень крупномасштабного перемешивания, при котором интенсивное перемешивание на микроуровне малоэффективно, возрастает с увеличением удельной скорости потребления растворенного газа.

3. Полученные аналитические зависимости между параметрами перемешивания, массопереноса и потребления при сорбции труднорастворимых газов могут быть использованы для выбора наименее энергоемкой конструкции перемешивающего устройства и режима ее работы в заданных технологических условиях ведения процесса.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Кафаров В. В., Винаров А. Ю., Гордеев Л. С. Моделирование биохимических реакторов. — М., Лесная пром-сть, 1979. — 344 с.