

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИИ НА ПРОЦЕСС МАССООБМЕНА В НАСАДОЧНОЙ ЭКСТРАКЦИОННОЙ КОЛОННЕ

А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева✉, Н. А. Меренцов, Ю. Н. Раева

*Кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»,  
ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»,  
zalipaevaolga@yandex.ru; Волгоград, Россия*

**Ключевые слова:** амплитуда и частота вибрации; высота и объем насадки; диаметр колонны; коэффициент массоотдачи; насадочная колонна; расход экстрагента; скорость движения капель; эквивалентный диаметр капель; экстракция.

**Аннотация:** Проведено физическое и математическое моделирование процесса жидкостной экстракции с учетом влияния вибрации на уменьшение толщины пограничных слоев сплошной фазы очищаемой жидкости и капель экстрагента около их поверхности. Это влияние в типовом алгоритме расчета учитывается в уравнениях относительной скорости движения капель, движущихся противоток в сплошной фазе очищаемой жидкости, а также в формуле зависимости эквивалентного диаметра капель от скорости вибрации, равной произведению круговой частоты на амплитуду. Приведены сравнительные расчеты экстракционной очистки трехкомпонентного раствора «вода – толуол – бензол» в насадочной колонне при типовом и модифицированном (с учетом вибрации) алгоритмах, показывающие увеличение коэффициентов массоотдачи и массопередачи и приводящие к снижению объема насадки и оптимального расхода экстрагента.

---

### Введение

Для интенсификации экстракционных процессов, уменьшения расхода экстрагента и снижения геометрических размеров колонн с середины прошлого века начали использовать вибрацию самих аппаратов при небольших их размерах и массах, либо отдельных узлов, либо пульсацию сплошной или дисперсной фаз на входе, либо пульсацию обеих фаз внутри аппаратов [1, 2]. Вибрацию в настоящее время широко применяют для разделения и смешивания различных сред [3 – 5].

В справочнике [6] показано, что применение вибрации приводит к увеличению поверхности дисперсной фазы за счет уменьшения среднего размера капель и снижению диффузионного сопротивления на границе. Для экстракции в системах «жидкость – жидкость» автор монографии [7] рекомендует использовать цилиндрические излучатели с частотой колебаний от 8 до 18 кГц и мощностью от 2,5 до 4,5 кВт. Скорость образования капель при этом возрастает в 2–3 раза. Это приводит к снижению высоты экстракционной колонны, но общий эффект увеличения массообмена за счет удельной мощности вибрации

$$J = (2\pi f)^3 A^2,$$

характеризующей мощность вибрации на единицу колеблющейся массы, Вт/кг, в случае экстракции уксусной кислоты водой из метилизобутилкетона удается

повысить всего на 13 – 15 %, то есть для системы экстракции «жидкость – жидкость» не мощность вибрации определяет общую эффективность данного массообменного процесса. В этой же работе показано, что для процессов выщелачивания в системе «твердое тело – жидкость» скорость процесса можно увеличить до 10 раз, что объясняется резким снижением диффузионного сопротивления в капиллярах твердой пористой частицы.

Рекомендации по технологическим режимам и геометрическим размерам виброэкстракционных аппаратов приведены в монографии [8]. Авторы рекомендуют амплитуду колебаний  $A = 3 \dots 4$  мм, частоту вибрации 20 Гц, а сами исследования проводились на амплитудах  $A = 0,8 \dots 5$  мм и частотах  $f = 15 \dots 50$  Гц. Но эксперименты проводились на пустотелом аппарате с перфорированными дисковыми тарелками с отношением их диаметров  $D_T/D_A = 0,35 \dots 0,45$  и отношением высоты жидкости к диаметру аппарата  $H/D_A = 1,4 \dots 1,5$  с электромагнитными вибраторами, совершающими возвратно поступательное движение вала с тарелками внутри экстрактора. Важно отметить увеличение производительности в 5–6 раз по сравнению с аппаратом с лопастной мешалкой и одновременное уменьшение затрат энергии в 2,2 раза. Аналогичный аппарат, но объемом  $80 \text{ м}^3$  и диаметром 3,2 м, представлен в работе [9].

Большое внимание виброэкстракционным процессам уделено в монографии [10], где подробно дано описание колонных аппаратов с насадкой в виде дисков различной конструкции, защищенных авторами свидетельствами как нашей страны, так и патентами зарубежных стран. Приведены результаты работы промышленных вибрационных экстракторов с насадками тарельчатого типа и экспериментальных исследований на полупромышленной установке по очистке смазочных масел в колонне диаметром 0,5 м и высотой 5,3 м, при этом в нижней части высотой 1,5 м находились кольца Рашига  $25 \times 25 \times 5$ , а в верхней – шесть перфорированных дисков, совершающих колебания с амплитудой 12 мм при частоте 0,8 Гц. Но ничего не сказано об эффективности работы насадочной колонны в вибрационном режиме по сравнению с типовым режимом без вибрации, только приведены сравнения для виброэкстракторов с вибрирующими дисками и аппаратов с мешалками [11, 12].

Таким образом, литературных источников по физическому и математическому моделированию виброэкстракционных процессов в аппаратах, заполненных насадочными телами (кольцами Рашига и другими элементами), с количественными результатами этих теоретических исследований крайне мало.

*Цель работы* – физическое и математическое моделирование виброэкстракционного процесса массопередачи в насадочной колонне и оценка влияния параметров вибрации – амплитуды и частоты, на технологические параметры и геометрические размеры самой колонны.

### **Расчет экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией**

В физической модели за основу взяты экспериментальные и теоретические исследования, связанные с уменьшением толщины диффузионных пограничных слоев на поверхности сплошной жидкой фазы и дисперсной фазы – капель эмульсии.

В монографиях, учебниках и статьях представлены результаты экспериментальных исследований и полученные критериальные уравнения, учитывающие влияние скоростей движения фаз в массообменных процессах на коэффициенты массоотдачи и массопередачи, и связанные с ними геометрические размеры аппаратов, в том числе насадочных экстракторов [13 – 19]. При физическом моделировании увеличение коэффициентов массоотдачи связано с уменьшением толщины

пограничных слоев сплошной и дисперсной фаз, в частном рассматриваемом случае на границе капли (рис. 1) с ростом числа Рейнольдса, как определяющего критерия, и соответственно с увеличением числа Нуссельта диффузионного (или Шервуда) в критериальных уравнениях [20].

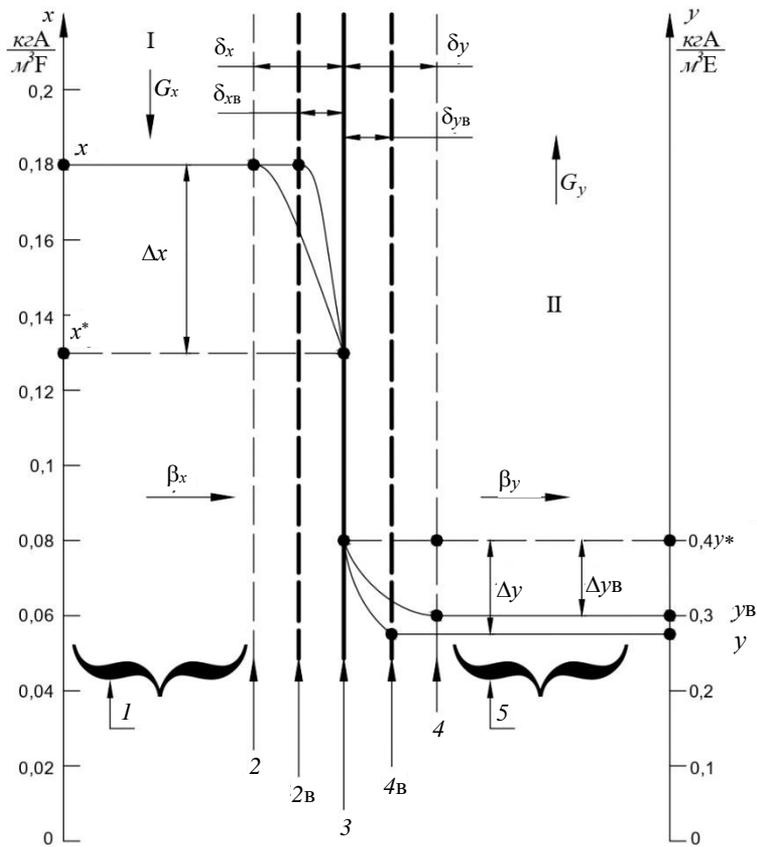
Ниже приводится фрагмент алгоритма расчета насадочной экстракционной колонны с формулами, учитывающими скорость вибрации, определяемую произведением  $2\pi fA$ . В таблице 1 приведены исходные и справочные данные для расчета экстракционной насадочной колонны, работающей в штатном режиме без вибрации и с вибрацией.

1. Скорость каплей относительно сплошной фазы очищаемого раствора с учетом вибрации

$$\omega'_0 = \sqrt{\omega_0^2 + (2\pi f A)^2}. \quad (1)$$

2. Удерживающая способность по каплям дисперсной фазы

$$F_y = (1 + \omega_d/\omega'_0 - \omega_c/\omega'_0)/2. \quad (2)$$



**Рис. 1. Изменение средних концентраций извлекаемого компонента из сплошной фазы – очищаемого раствора (I) и в каплях экстрагента (II):**

1 – ядро потока сплошной фазы очищаемого раствора; 2 – пограничный слой со стороны сплошной фазы; 3 – граница раздела фаз (поверхность капли); 4 – пограничный слой со стороны дисперсной фазы в экстрагенте; 5 – ядро капли экстрагента (в – виброэкстракционный процесс, - - - – пограничный слой в режиме без вибрации; - - - - с вибрацией)

Таблица 1

**Исходные и справочные данные для расчета экстракционной насадочной колонны, работающей в штатном режиме без вибрации и с вибрацией**

Наименование параметра	Величина параметра в режиме	
	без вибрации	с вибрацией
<i>Исходные данные</i>		
Производительность по очищаемому раствору $G_x$ , кг/ч	100	
Начальная концентрация извлекаемого компонента $x_f$ , кгА/м <sup>3</sup>	0,3	
Конечная концентрация извлекаемого компонента $x_r$ , кгА/м <sup>3</sup>	0,06	
Начальная концентрация извлекаемого компонента в экстрагенте $y_s$ , кгА/м <sup>3</sup>	0,01	
<i>Справочные данные</i>		
Плотность очищаемого раствора $\rho_x$ , кг/м <sup>3</sup>	1000	
Плотность экстрагента $\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	900	
Вязкость очищаемого раствора $\mu_x$ , Па·с	0,001	
Вязкость экстрагента $\mu_y$ , Па·с	0,00063	
Наружный диаметр колец Рашига $35 \times 35 \times 4 d_n$ , м	0,038	
Порозность насадки $\varepsilon$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,72	
Толщина стенки колец Рашига $\delta$ , м	0,0044	
Коэффициент диффузии извлекаемого компонента в сплошной фазе $D_x$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$1,05 \cdot 10^{-9}$	
То же для экстрагента $D_y$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	$2 \cdot 10^{-9}$	
Поверхностное натяжение капель в сплошной фазе очищаемой жидкости $\delta_p$ , Н/м	0,0341	
Константа равновесия $m$ , кгY/кгX	2,22	
Масса вибрирующих узлов $m_d$ , кг	–	40
Амплитуда колебаний $A$ , м		$5 \cdot 10^{-4}$
Частота колебаний $f$ , Гц		30

3. Диаметр капель дисперсной фазы

$$d_k = 0,92 \sqrt{\delta_p / g \Delta \rho} \omega'_o \varepsilon F_y / \left[ \omega_d (1 - F_y) \right]. \quad (3)$$

4. Число Рейнольдса при вибрации для очищаемого раствора

$$Re_x = \rho_x \omega'_o d_k / \mu_x. \quad (4)$$

5. Число Нуссельта диффузионного (Шервуда) для очищаемого раствора

$$Nu'_x = 50 + 0,0085 Re_x Pr_x^{0,7}. \quad (5)$$

6. Коэффициент массоотдачи для очищаемого раствора

$$\beta'_x = Nu'_x D_x / d_k. \quad (6)$$

7. Вспомогательный коэффициент для расчета коэффициента массоотдачи в каплях дисперсной фазы

$$K_{\beta y} = \rho_x^2 \delta_p^3 / (g \Delta \rho \mu_x^4). \quad (7)$$

8. Среднее время пребывания капель дисперсной фазы в насадке

$$\tau_y = F_y H_B / \omega_d \cdot \quad (8)$$

9. Число Фурье для капель дисперсной фаз

$$Fo_y = 4D_y \tau_y / d_k^2 \cdot \quad (9)$$

10. Число Нуссельта диффузионного (Шервуда) для капель дисперсной фазы

$$Nu'_y = (0,32 / Fo_y^{0,14}) Re_x^{0,68} K_{\beta y}^{0,1} \cdot \quad (10)$$

11. Коэффициент массоотдачи для капель дисперсной фазы

$$\beta_y = Nu'_y D_y / d_k \cdot \quad (11)$$

12. Коэффициент массопередачи с учетом вибрации

$$K_x = \frac{1}{1/\beta_x + 1/(m\beta_y)} \cdot \quad (12)$$

13. Мощность вибропривода

$$N_{вп} = 1,2 \left[ A^2 (2\pi f)^3 m_d \right] \cdot \quad (13)$$

14. Общая мощность насосов и вибропривода

$$N_{об} = N_n + N_{вп} \cdot \quad (14)$$

В таблице 2 приведены полученные расчетные параметры экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией ( $f = 30$  Гц,  $A = 0,5$  мм).

Таблица 2

**Расчетные параметры экстракционной насадочной колонны, работающей в стандартном режиме (без вибрации) и с вибрацией**

Наименование параметра	Величина параметра в режиме	
	без вибрации	с вибрацией
1	2	3
Минимальный расход экстрагента $G_{ym}$ , кг/ч	36,59	
Рабочий расход экстрагента $G_y$ , кг/ч	46,23	43,56
Конечная концентрация извлекаемого компонента А в экстрагенте $y_e$ , кг/м <sup>3</sup>	0,529	0,561
Равновесная концентрация компонента А очищаемой жидкости, соответствующая его начальной концентрации в очищаемом растворе $x_c^*$ , кг/м <sup>3</sup>	0,666	
Удельная поверхность колец Рашига при упорядоченной укладке их в колонне $\sigma$ , м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	142	
Эквивалентный диаметр насадки – колец Рашига $d_3$ , м	0,0203	
Абсолютное значение разности плотностей капель экстрагента и очищаемого раствора $\Delta\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	100	
Коэффициент избытка экстрагента $K_n$	1,264	1,191
Скорость захлебывания для очищаемого раствора (сплошная фаза) $\omega_3$ , м/с	0,0360	0,0355

Продолжение табл. 2

1	2	3
Рабочая фиктивная скорость очищаемого раствора $\omega_p$ , м/с	0,027	0,0266
Диаметр колонны (расчетный) $D_p$ , м	1,144	1,154
Стандартный диаметр колонны $D_A$ , м	1,2	
Фиктивная скорость сплошной фазы в стандартной колонне $\omega_c$ , м/с	0,0246	
Число единиц переноса по концентрации компонента А в сплошной фазе (исходном растворе)	4,1	4,68
Относительная скорость капель дисперсной фазы – экстрагента $\omega_o$ , м/с	0,133	0,163
Фиктивная скорость капель дисперсной фазы – экстрагента $\omega_d$ , м/с	0,0136	0,0107
Отношение фиктивных скоростей сплошной и дисперсной фаз (очищаемого раствора и капель) $b$	0,462	0,436
Наибольшее значение удерживающей способности по каплям дисперсной фазы $F_y$ , м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup>	0,107	0,072
Диаметр капель экстрагента $d_k$ , м	0,0055	0,0051
Число Рейнольдса для сплошной фазы – очищаемого раствора $Re_x$	735,3	763,8
Число Прандтля для сплошной фазы $Pt_x$	952,4	
Коэффициент массоотдачи от сплошной фазы к поверхности капель $\beta_x$ , м/с	$1,54 \cdot 10^{-4}$	$1,88 \cdot 10^{-4}$
Средняя движущая сила по сплошной фазе $\Delta x_f$ , кгА/м <sup>3</sup> F	0,0585	0,0513
Площадь сечения стандартной колонны $S_k$ , м <sup>2</sup>	1,13	1,54
Высота насадки в колонне (расчетная) $H_b$ , м	6,074	5,75
Время пребывания сплошной фазы (очищаемого раствора) в колонне $\tau_b$ , с	247,2	233,9
Число Нуссельта диффузионное: по дисперсной фазе $Nu_y$	589	650
по сплошной фазе $Nu_x$	810	905,2
Коэффициент массоотдачи от поверхности капли внутрь $\beta_y$ , м/с	$2,14 \cdot 10^{-4}$	$2,57 \cdot 10^{-4}$
Коэффициент массопередачи от сплошной фазы (очищаемого раствора) к каплям дисперсной фазы (экстрагента) $K_x$ , кгА/м <sup>2</sup> с	$1,16 \cdot 10^{-4}$	$1,41 \cdot 10^{-4}$
Объем насадки в колонне $V_b$ , м <sup>3</sup>	6,245	6,04
Доля затрат электроэнергии в общих годовых затратах $O_{эл}$ , %	13,23	17,85
Общая годовая стоимость эксплуатации колонны $S_{об}$ , р./год	65237	65188
Затраты мощности насосов и вибраторов $N_n$ , Вт	199,8	189,1
Затраты на вибропривод $N_{вп}$ , Вт	0	80,2
Доля капитальных затрат $O_k$ , %	17,04	16,4

## Заключение

При одинаковых годовых затратах на эксплуатацию насадочной экстракционной колонны в типовом режиме работы (без вибрации) и с вибрацией (частота колебаний  $f = 30$  Гц, амплитуда  $A = 0,5$  мм) оптимальное значение коэффициента избытка экстрагента  $K_{и}$  снижается с 1,264 до 1,191, а расход экстрагента (при производительности по сплошной фазе  $G_x = 100$  кг/ч) уменьшается с 46,25 до 43,56 кг/ч. Годовая экономия расхода экстрагента составляет 19,37 т/год.

Вибрация увеличивает относительную скорость капель дисперсной фазы относительно потока сплошной фазы  $\omega_0$  с 0,133 до 0,163 м/с, то есть на 22,5 %, и уменьшает эквивалентный диаметр капель  $d_k$  с 5,5 до 5,1 мм. Это увеличение скорости уменьшает толщину пограничных слоев около поверхности капель, увеличивает общую поверхность капель и способствует возрастанию коэффициентов массоотдачи. Коэффициент массопередачи  $K_x$  при вибрации возрастает с  $1,16 \cdot 10^{-4}$  до  $1,41 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>2</sup>с.

Объем насадки в колонне снижается незначительно, с величины 6,245 м<sup>3</sup> до 6,04 м<sup>3</sup>, при этом стандартный диаметр колонны остается неизменным  $D_A = 1,2$  м.

При выбранных параметрах вибрации – частоте  $f = 30$  Гц и амплитуде  $A = 0,5$  мм, мощности насосов и вибратора (при применении вибрации) и только мощности насосов без вибрации, практически одинаковые (190 и 200 Вт соответственно), то есть экономия энергии в годовом исчислении незначительна и составляет 72 кВт·ч за год. Таким образом, основное преимущество вибрации при эксплуатации насадочной экстракционной колонны связано в рассматриваемом случае с уменьшением расхода экстрагента на 5,8 % и объема насадки на 3,4 %. Увеличение амплитуды или частоты вибрации может привести к увеличению эффективности процесса экстракции, но вызовет резкое возрастание затрат энергии, которая увеличивается пропорционально квадрату амплитуды и кубу частоты колебаний вибропривода.

### Список литературы

1. Задорский, В. М. Интенсификация газожидкостных процессов химической технологии / В. М. Задорский. – Киев : Техніка, 1979. – 198 с.
2. Федоткин, И. М. Физико-математические основы интенсификации процессов и аппаратов пищевой и химической технологии / И. М. Федоткин. – Кишинев : Штиинца, 1987. – 264 с.
3. Calculations of the Amplitude of Vibrations in Resonant and Near-Resonant Processes of a Vibrating Centrifugal Separator / A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva, N. A. Merentsov, Yu. N. Raeva // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131, Issue 12. – P. 1185 – 1189.
4. Пат. № 209700 Российская Федерация, МПК В01F31/00. Вибросмеситель / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, П. П. Залипаев, Н. В. Шибитова, Н. А. Меренцов, А. А. Шурак ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»; заявл. 08.07.2021 ; опублик. 18.03.2022, Бюл. № 8.
5. Влияние вибрации на технологические и геометрические параметры насадочной абсорбционной колонны / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. И. Чурикова, П. П. Залипаев // Экологические системы и приборы. – 2024. – № 3. – С. 14 – 21.
6. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н.Ф. Бочкаревой, 2003. – Т. 1. – 884 с.

7. Новицкий, Б. Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах / Б. Г. Новицкий. – М. : Химия, 1983. – 192 с.
8. Ворсановфьев, В. Д. Вибрационная техника в химической промышленности / В. Д. Ворсановфьев, Э. Э. Кольман-Иванов. – М. : Химия, 1985. – 240 с.
9. Филин, В. Л. Развитие техники перемешивания жидких сред / В. Л. Филин. – М. : ЦИНТИХимнефтемаш, 1980. – 26 с.
10. Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Луганов ; под общ. ред. В. М. Олевского. – М. : Химия, 1980. – 192 с.
11. Контактные насадки промышленных теплообменных аппаратов : монография / А. М. Каган, А. Г. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов ; под ред. А. Г. Лаптева. – Казань : Отечество, 2013. – 454 с.
12. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн : монография / Б. А. Сокол, А. К. Чернышев, Д. А. Баранов. – М. : Галилея-принт, 2009. – 358 с.
13. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 14-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008. – 750 с.
14. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008. – 494 с.
15. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химических технологий / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.
16. Тимонин, А. С. Основы конструирования и расчета химико-технологического и природоохранного оборудования : справочник / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд-во Н. Бочкаревой, 2002. – Т. 2. – 1028 с.
17. Лаптев, А. Г. Математические модели и методы расчетов теплообменных и сепарационных процессов в двухфазных средах : монография / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров, Е. А. Лаптев. – Казань : КТЭУ ; Старый Оскол : ТНТ, 2021. – 288 с.
18. Лаптев, А. Г. Эффективность теплообмена и разделения гетерогенных сред в аппаратах нефтегазохимического комплекса / А. Г. Лаптев, М. М. Башаров. – Казань : Центр инновационных технологий, 2016. – 344 с.
19. Основы жидкостной экстракции / Г. А. Ягодин [и др.] ; под ред. Г. А. Ягодина. – М. : Химия, 1981. – 400 с.
20. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ 2019611290. Программа для расчета насадочной экстракционной колонны с учетом продольной диффузии / А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, К. В. Черикова; правообладатель ФГБОУ ВПО «ВГТУ». – № 2019610017; заявл. 09.01.2019; зарег. 24.01.2019 Бюл. № 2.

---

## Evaluation of Impact of Vibration on Mass Transfer Process in Packed Extractor Column

A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva✉, N. A. Merentsov, Yu. N. Raeva

*Department of Processes and Apparatuses of Chemical and Food Production,  
Volgograd State Technical University, zalipaevaolga@yandex.ru; Volgograd, Russia*

**Keywords:** vibration amplitude and frequency; packing height and volume; column diameter; mass transfer coefficient; packed column; extractant flow rate; droplet velocity; equivalent droplet diameter; extraction.

**Abstract:** Physical and mathematical modeling of the liquid extraction process is carried out taking into account the influence of vibration on the reduction in the thickness of the boundary layers of the continuous phase of the purified liquid and the extractant droplets near their surface. This influence in the standard calculation algorithm is taken into account in the equations of the relative velocity of droplets moving countercurrently in the continuous phase of the liquid being purified, as well as in the formula for the dependence of the equivalent diameter of droplets on the vibration velocity, which is equal to the product of the circular frequency and the amplitude. An example of comparative calculations of extraction purification of a three-component solution of “water-toluene-benzene” in a packed column is given using standard and modified (taking into account vibration) algorithms, showing an increase in the mass transfer and mass transfer coefficients and leading to a decrease in the volume of the packing and the optimal consumption of the extractant.

### References

1. Zadorskij V.M. *Intensifikaciya gazozhidkostnykh processov khimicheskoy tekhnologii* [Intensification of gas-liquid processes in chemical engineering], Kiev: Tekhnika, 1979, 198 p. (In Russ.).
2. Fedotkin I.M. *Fiziko-matematicheskie osnovy intensifikacii processov i apparatov pishchevoj i khimicheskoy tekhnologii* [Physical and mathematical foundations of intensification of processes and equipment for food and chemical technology], Kishinev: Shtiinca, 1987, 264 p. (In Russ.).
3. Golovanchikov A.B., Zalipaeva O.A., Merentsov N.A., Raeva Yu.N. Calculations of the Amplitude of Vibrations in Resonant and Near-Resonant Processes of a Vibrating Centrifugal Separator, *Optics and Spectroscopy*, 2023, vol. 131, issue 12, pp. 1185-1189.
4. Golovanchikov A.B., Zalipayeva O.A., ShishkinYe.V., Merentsov N.A., Prokhorenko N.A., Zalipayev P.P. *Vibrosmesitel'* [Vibrating mixer], Russian Federation, 2022, UM 209700 (In Russ.).
5. Golovanchikov A.B., Merencov N.A., Churikova V.I., Zalipaev P.P. [The influence of vibration on the technological and geometric parameters of a packed absorption column], *Ehkologicheskie sistemy i pribory* [Ecological systems and devices], 2024, no. 3, pp. 14-21 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Timonin A.S. *Inzhenerno-ehkologicheskij spravochnik* [Engineering and Ecological Handbook], Kaluga: Izdatel'stvo N.F. Bochkarevoj, 2003, 884 p. (In Russ.).
7. Novitskiy B.G. *Primeneniye akusticheskikh kolebaniy v khimiko-tekhnologicheskikh protsessakh* [Application of acoustic oscillations in chemical and technological processes], Moscow: Khimiya, 1983, 191 p. (In Russ.).
8. Vorsanof'yev V.D., Kol'man-Ivanov E.E. *Vibratsionnaya tekhnika v khimicheskoy promyshlennosti* [Vibration technique in the chemical industry], Moscow: Khimiya, 1985, 240 p. (In Russ.).
9. Filin V.L. *Razvitie tekhniki peremeshivaniya zhidkikh sred* [Development of liquid mixing technology], Moscow: CINTIKhimneftemash, 1980, 26 p. (In Russ.).
10. Gorodetskiy I.A., Vasin A.A., Olevskiy V.M. (Ed.), Lukanov P.A. *Vibratsionnyye massoobmennyye apparaty* [Vibratory mass transfer apparatus], Moscow: Khimiya, 1980, 190 p. (In Russ.).
11. Kagan A.M., Laptev A.G., Pushnov A.S., Farakhov M.I. *Kontaktnye nasadki promyshlennykh teplomassoobmennykh apparatov* [Contact packings for industrial heat and mass transfer devices], Kazan': Otechestvo, 2013, 454 p. (In Russ.).
12. Sokol B.A., Chernyshev A.K., Baranov D.A. *Nasadki massoobmennykh kolonn* [Packings for mass transfer columns], Moscow: Galileyaprint, 2009, 358 p. (In Russ.).

13. Kasatkin A.G. *Osnovnye process i apparaty khimicheskoy tekhnologii: uchebnyk dlya vuzov* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering], Moscow: Al'yans, 2008, 750 p. (In Russ.).
14. Dytnerskiy Yu.I. *Osnovnye process i apparaty khimicheskoy tekhnologii: posobie po proektirovaniyu* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering], Moscow: Al'yans, 2008. 494 p. (In Russ.).
15. Pavlov K.F., Romankov P.G., Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu processov i apparatov khimicheskikh tekhnologij* [Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technologies], Moscow: Al'yans, 2013. 576 p. (In Russ.).
16. Timonin A.S. *Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimiko-tekhnologicheskogo i prirodookhrannogo oborudovaniya* [Fundamentals of design and calculation of chemical-technological and environmental protection equipment], Kaluga: Izdatel'stvo N. Bochkarevoj, 2002, 1028 p. (In Russ.).
17. Laptev A.G., Basharov M.M., Laptev E.A. *Matematicheskie modeli i metody raschetov teplomassoobmennykh i separacionnykh processov v dvukhfaznykh sredakh: monografiya* [Mathematical models and calculation methods for heat and mass transfer and separation processes in two-phase media], Kazan': KTEHU; Staryj Oskol: TNT, 2021, 288 p. (In Russ.).
18. Laptev A.G., Basharov M.M. *Ehffektivnost' teplomassoobmena i razdeleniya geterogennykh sred v apparatakh neftegazokhimicheskogo kompleksa* [Efficiency of heat and mass transfer and separation of heterogeneous media in the apparatus of the oil and gas chemical complex], Kazan': Centr innovacionnykh tekhnologij, 2016, 344 p. (In Russ.).
19. Yagodin G.A. *Osnovy zhidkostnoj ehkstrakcii* [Basics of Liquid Extractio], Moscow: Khimiya, 1981, 400 p. (In Russ.).
20. Golovanchikov A.B., Prokhorenko N.A., Merentsov N.A., Chirikova K.V. Programm. *Programma dlya raschyota nasadochnoj ehkstrakcionnoj kolonny s uchytom prodol'noj diffuzii* [Program for calculating a packed extraction column taking into account longitudinal diffusion], Russian Federation, 2019, Computer Program 2019611290 (In Russ.).

---

## **Bewertung des Einflusses von Vibrationen auf den Stofftransferprozess in der Aufsatz-Extraktionssäule**

**Zusammenfassung:** Es ist eine physikalische und mathematische Modellierung der Flüssigkeitsextraktion durchgeführt, wobei der Einfluss von Vibrationen auf die Verringerung der Dicke der Grenzschichten der kontinuierlichen Phase der zu reinigenden Flüssigkeit und der Extraktionsmitteltröpfchen nahe ihrer Oberfläche berücksichtigt ist. Dieser Einfluss im typischen Berechnungsalgorithmus ist in den Gleichungen der relativen Geschwindigkeit von Tröpfchen berücksichtigt, die sich in der kontinuierlichen Phase der zu reinigenden Flüssigkeit im Gegenstrom bewegen, sowie in der Formel für die Abhängigkeit des äquivalenten Tropfdurchmessers von der Schwingungsgeschwindigkeit, die dem Produkt der Kreisfrequenz pro Amplitude entspricht. Vergleichende Berechnungen der Extraktionsreinigung der dreiteiligen Wasser–Toluol–Benzol–Lösung in der Aufsatzsäule sind bei typischen und modifizierten Algorithmen (unter Berücksichtigung von Vibrationen) angegeben, die die Erhöhung der Stoffübergangs- und Stoffaustauschkoeffizienten zeigen und zu einer Verringerung des Aufsatzvolumens und des optimalen Extraktionsverbrauchs führen.

## Évaluation de l'impact des vibrations sur le processus d'échange de masse dans la colonne d'extraction de la buse

**Résumé:** Est réalisée une simulation physique et mathématique du processus d'extraction de liquide en tenant compte de l'effet des vibrations sur la réduction de la masse des couches limites de la phase solide du liquide purifié et des gouttelettes d'extragent près de leur surface. Cette influence dans l'algorithme de calcul type est prise en compte dans les équations de la vitesse relative des gouttelettes se déplaçant à contre-courant dans la phase continue du liquide purifié, ainsi que dans la formule de la dépendance du diamètre équivalent des gouttelettes à partir d'une vitesse de vibration égale à la production d'une fréquence circulaire par amplitude. Sont présentés les calculs comparatifs de la purification d'extraction de la solution à trois composants «eau – toluène – benzol» dans la colonne de buse avec des algorithmes typiques et modifiés (en tenant compte de la vibration), montrant une augmentation des coefficients de transfert de masse et entraînant une diminution du volume de la buse et du débit optimal.

---

**Авторы:** *Голованчиков Александр Борисович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Залипаева Ольга Александровна* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Меренцов Николай Анатольевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств»; *Раева Юлия Николаевна* – магистрант, ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», Волгоград, Россия.