Оргинальное практическое исследование
УДК: 66.061.35
DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36

МАСШТАБНЫЙ ПЕРЕХОД КОМБИНИРОВАННОГО КОНТАКТНОГО УСТРОЙСТВА ДЛЯ ПРОЦЕССА ЖИДКОСТНОЙ ЭКСТРАКЦИИ

Юрий Васильевич Козин[1], Михаил Георгиевич Беренгартен[2]

[1]Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина, г. Рязань, Россия
[2]Московский политехнический университет, Москва, Россия

© Козин Ю. В., Беренгартен М. Г., 2026

Автор-корреспондент: Ю. В. Козин, e-mail: yura_kozin@mail.ru

АННОТАЦИЯ

В статье рассматривается проблема повышения эффективности жидкостной экстракции путём комбинирования в одном аппарате тарельчатых и насадочных контактных устройств. Цель работы — разработка метода расчёта основных массообменных и гидравлических параметров комбинированного контактного устройства (ККУ), позволяющего исключить масштабный эффект и ускорить внедрение передового оборудования.

В теоретической части обоснован выбор моделей структуры потоков: для тарельчатой секции используется ячеечная модель, для насадочной — диффузионная. Экспериментально определены параметры моделей: число Пекле для насадочной секции составляет 15–25, эффективный коэффициент продольного перемешивания $D_{эф} = (0{,}4 – 0{,}6) \cdot 10^{-3}$ м^2/с. Показано, что наличие тарелок снижает продольное перемешивание в насадке в два раза по сравнению с чисто насадочной колонной.

На основе моделей и регрессионных зависимостей разработан алгоритм инженерного расчёта экстрактора с ККУ, включающий семь этапов: от ввода исходных данных до технико-экономической оценки. Установлено, что при оптимальном соотношении подачи экстрагента (0,4:0,6) высота эквивалентной теоретической тарелки (ВЭТТ) составляет 0,35–0,55 м, что на 20–50 % ниже, чем для традиционных устройств.

Полученные зависимости и алгоритм могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих экстракционных колонн в нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности.

Ключевые слова: жидкостная экстракция, жидкость-жидкость, массообмен, комбинированные контактные устройства, экстракционная колонна

Для цитирования: Козин Ю. В., Беренгартен М. Г. Масштабный переход комбинированного контактного устройства для процесса жидкостной экстракции // Технология и энергетика. 2026. № 3 (3). С. 32–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36.

SCALE-UP OF A COMBINED CONTACT DEVICE FOR LIQUID EXTRACTION

Yuri Vasilievich Kozin[1], Mikhail Georgievich Berengarten[2]

[1]Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin, Ryazan, Russia
[2]Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

Corresponding author: Yu. V. Kozin, e-mail: yura_kozin@mail.ru

ABSTRACT

The paper addresses the problem of enhancing liquid extraction efficiency by combining tray and packed contacting devices within a single apparatus. This work aims to develop a method for calculating the main mass-transfer and hydraulic parameters of a combined contact device (CCD) to eliminate the scale effect and speed up the adoption of advanced equipment.

In the theoretical part, the selection of flow structure models is substantiated. A cell model is employed for the tray section, whereas a diffusion model is employed for the packed section. The parameters of the models were determined experimentally: the Peclet number for the packed section is in the range of 15–25, and the effective longitudinal mixing

coefficient D_{eff}=(0.4–0.6) × 10^{-3} m^2/s. It is shown that the presence of trays reduces longitudinal mixing in the packing by half compared to a purely packed column.
Based on the models and regression dependencies, a seven-stage engineering calculation algorithm for an extractor with a CCD has been developed, from input data entry to technical and economic evaluation. It was found that at the optimal extractant feed ratio (0.4:0.6), the height equivalent to a theoretical plate (HETP) is 0.35–0.55 m, which is 20–50 % lower than in conventional devices.
The derived dependencies and the algorithm can be used to design new and upgrade existing extraction columns in refining, chemical, and petrochemical industries.

Keywords: liquid extraction, liquid-liquid, mass transfer, combined contact devices, extraction column

For citation: Kozin Yu. V., Berengarten M. G. (2026) 'Scale-up of a combined contact device for liquid extraction', Technology and Energy, no. 3(3), pp. 32–36. DOI: 10.46418/3033-7852_2026_3_3_32–36.

ВВЕДЕНИЕ

В промышленных установках экстракции систем жидкость—жидкость используются в основном аппараты с одним типом контактного устройства тарелки или насадка, для которых достаточно разработаны методики и алгоритмы расчетов [1]. Одним из направлений повышении эффективности существующих жидкостных экстракторов является комбинация в одном аппарате различных типов контактных устройств. Методики расчета основных массообменных и гидравлических характеристик комбинированных контактных устройств недостаточны [2, 3]. Существующие разработанные методы относятся к лабораторным образцам жидкостных экстракторов и описаны эмпирическими уравнениями. Данный недостаток не позволяет исключить масштабный эффект и переходить с лабораторных образцов оборудования к промышленным [4, 6]. Целью данной работы является разработка метода расчета основных массообменных и гидравлических параметров для комбинированных контактных устройств, исключение масштабного эффекта, ускорение внедрения передовых типов оборудования в промышленности.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

ВЭТТ — высота эквивалентной теоретической тарелки;
ВЭП — высота единицы переноса;
ККУ — комбинированное контактное устройство;
Pe — число Пекле;
M — коэффициент массопередачи;
n — число единиц переноса;
$N_{яч}$ — число ячеек;
$D_{эф}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания, $м^2/с$;
C — концентрация распределяемого компонента, $кг/м^3$;
W — скорость потока, м/с;
r — скорость массопереноса, $кг/ (м^3 \cdot с)$;
z — координата по высоте, м.
$n_{тар}$ — число тарелок, ед.;
L — расход исходного сырья (легкой фазы), кг/ч;
$X_н$ — начальная концентрация целевого компонента в сырье, мас. %;
$X_к$ — требуемая конечная концентрация в рафинате, мас. %;
T — температура процесса, К;
m — коэффициент распределения;
G_{min} — минимальный расход экстрагента, $м^3/ч$;
$N_т$ — число теоретических ступеней разделения, ед.;
Dэф — эффективный коэффициент продольного перемешивания, м/с;
R^2 — коэффициент детерминации.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ. ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Эффективность работы массообменного аппарата в системе «жидкость—жидкость» в значительной степени определяется гидродинамической обстановкой, а именно — структурой потоков контактирующих фаз [6]. Отклонение от идеальной модели противотока (поршневого течения) приводит к снижению движущей силы массообмена и, как следствие, к уменьшению реальной эффективности разделения по сравнению с теоретически достижимой [7]. Поэтому при разработке методики расчёта комбинированного контактного устройства (ККУ) необходимо обоснованно выбрать математические модели, описывающие продольное перемешивание в тарельчатой и насадочной секциях.

Для количественного описания продольного перемешивания в насадочной секции ККУ используется диффузионная модель. Как показано в фундаментальных работах [8, 9], ключевыми параметрами этой модели являются:

- диффузионное число Пекле (Pe);
- коэффициент массопередачи (M);
- число единиц переноса (n);

Определены следующие диапазоны чисел Pe для разработанного ККУ:

- для насадочной секции: Pe = 15÷25;

– для тарельчатой секции (ячеечная модель): число ячеек $N_{яч}$ равно числу тарелок, что соответствует эффективному Pe = 10–15.

Сравнение полученных значений с данными для традиционных насадочных колонн (Pe = 8–12) показывает, что применение ККУ позволяет снизить продольное перемешивание на 30–40 %, что прямо коррелирует с повышением эффективности массообмена.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

На основании экспериментальных исследований структуры потоков было установлено, что для ККУ в целом справедлива комбинированная модель: тарельчатая секция описывается ячеечной моделью, а насадочная — диффузионной. Параметры моделей структуры потоков для различных типов контактных устройств приведены в таблице.

Как следует из таблицы, наличие тарелок перед насадочной секцией приводит к «обнулению» профиля концентраций и снижению эффективного коэффициента продольного перемешивания в насадке примерно в два раза по сравнению с чисто насадочной колонной. Это объясняется тем, что тарелки выступают в роли перераспределителей потока, устраняя неравномерности, возникшие в нижележащих слоях насадки [10].

Для количественного описания продольного перемешивания в насадочной секции ККУ используется диффузионная модель, которая для стационарного противоточного течения записывается в виде [9]:

$$D_{эф}\frac{d^2C}{dz^2} - w\frac{dC}{dz} + r = 0, \qquad (1)$$

где $D_{эф}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания, м²/с;
C — концентрация распределяемого компонента, кг/м³;
w — скорость потока, м/с;
r — скорость массопереноса, кг/ (м³·с);
z — координата по высоте, м.

Экспериментально установлено, что для ККУ при оптимальном соотношении подачи экстрагента (0,4 : 0,6) число Пекле составляет 15–25, что свидетельствует о режиме, близком к идеальному вытеснению (Pe → ∞). Для сравнения: в чисто насадочной колонне того же диаметра Pe = 8–12.

Для тарельчатой секции ККУ используется ячеечная модель, в которой число ячеек полного смешения $N_{яч}$ приближённо равно числу тарелок $n_{тар}$.

Таким образом, предложенная комбинированная модель (ячеечная для тарельчатой секции + диффузионная для насадочной) адекватно описывает гидродинамическую обстановку в разработанном ККУ. Эта модель положена в основу расчетов ВЭТТ, ВЕП и гидравлического сопротивления

АЛГОРИТМ ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА ЭКСТРАКТОРА С ККУ

На основе разработанных моделей и полученных регрессионных зависимостей составлен алгоритм инженерного расчёта экстрактора с комбинированным контактным устройством. Алгоритм предназначен для определения основных геометрических размеров аппарата (диаметра, высоты) и режимных параметров (расходов фаз) при заданной производительности и требуемой степени извлечения целевого компонента [11].

Алгоритм включает следующие этапы:

Этап 1. Ввод исходных данных. Задаются: расход исходного сырья (легкой фазы) L, кг/ч; начальная концентрация целевого компонента в сырье $X_н$, мас. %; требуемая конечная концентрация в рафинате $X_к$, мас. %; физико-химические свойства фаз; температура процесса T, К.

Этап 2. Расчёт равновесия. По формуле рассчитывается коэффициент распределения $m = 0{,}00192T2 - -1{,}3078T + 232{,}56$. Определяется минимальный расход экстрагента G_{min} из материального баланса.

Этап 3. Выбор соотношения подачи экстрагента. На основании экспериментальных данных принимается

Таблица. Параметры моделей структуры потоков для различных типов контактных устройств
Table. Flow Structure Model Parameters for Various Contact Device Types

Тип контактного устройства	Модель	$N_{яч}$, ед.	$D_{эф}$, м²/с
Тарельчатый (5 тарелок)	Ячеечная	4,5 – 5,5	–
Насадочный (регулярная насадка, H=1 м)	Диффузионная	–	$(0{,}8 – 1{,}2)\cdot10^{-3}$
ККУ (5 тарелок+насадка 1 м)	Комбинированная	4,8 – 5,2 (в тарельч. секции)	$(0{,}4 – 0{,}6)\cdot10^{-3}$ (в нас. секции)

оптимальное соотношение подачи экстрагента: 40 % на тарелки, 60 % на насадку [12].

Этап 4. Расчёт числа теоретических ступеней. Построением рабочей и равновесной линий (или аналитическим методом) определяется число теоретических ступеней разделения $N_т$.

Этап 5. Расчёт ВЭТТ и высоты колонны. Рассчитывается значение ВЭТТ для ККУ с учётом режимных параметров. Высота массообменной зоны:

$$H = \text{ВЭТТ} \cdot N_т. \quad (2)$$

Общая высота колонны принимается с учётом отстойных зон и конструктивных запасов.

Этап 6. Проверка по гидравлическому сопротивлению. Рассчитывается суммарное гидравлическое сопротивление ККУ.

Этап 7. Технико-экономическая оценка. Рассчитываются капитальные затраты (металлоёмкость) и эксплуатационные расходы (энергопотребление на перекачивание фаз, расход экстрагента, затраты на регенерацию). Оценивается срок окупаемости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обоснована применимость комбинированной модели структуры потоков для разработанного ККУ: тарельчатая секция описывается ячеечной моделью, насадочная секция — диффузионной моделью (эффективный коэффициент продольного перемешивания Dэф = (0,4 – 0,6) · 10^{-3} м^2/с). Наличие тарелок снижает Dэф в насадке в 2 раза по сравнению с чисто насадочной колонной. Для количественного описания продольного перемешивания ключевыми параметрами этой модели являются: диффузионное число Пекле (Pe), коэффициент массопередачи (M), число единиц переноса (n).

2. Предложенная комбинированная модель (ячеечная для тарельчатой секции + диффузионная для насадочной) адекватно описывает гидродинамическую обстановку в разработанном ККУ. Эта модель положена в основу расчетов ВЭТТ, ВЕП и гидравлического сопротивления. Установлено, что при оптимальном соотношении подачи растворителя в экстрактор (0,4:0,6) ВЭТТ составляет 0,35–0,55 м, что на 20–50 % ниже, чем для традиционных контактных устройств.

3. В целях исключения масштабного эффекта впервые для жидкостных экстракторов с комбинированными контактными устройствами предложена методика инженерного расчета на основе разработанных моделей и полученных в результате экспериментов регрессионных зависимостей. Полученные зависимости и алгоритм могут быть использованы при проектировании новых и модернизации существующих экстракционных колонн для систем «жидкость—жидкость» в нефтеперерабатывающей, химической и нефтехимической промышленности.

Список литературы

1. Карпеев С. В. Расчет процесса экстракции в системе жидкость—жидкость. Пат. 2020613676 РФ. 2020.
2. Карпов С. А., Брендаков В. Н., Иванов К. А., Журавлев А. А. Математическая модель пульсационной экстракционной колонны // Вестник национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». 2021. Т. 10. № 2. С. 168.
3. Лаптев А. Г., Данилов В. А., Аюпов Л. Г. Модель процесса экстракции на ситчатой тарелке с учетом особенностей взаимодействия фаз // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38. № 5. С. 532.
4. Кошевой Е. П., Блягоз Х. Р., Сиюхов Х. Р., Схаляхов А. А., Чундышко В. Ю. Универсальная установка для экстракции двуокисью углерода // Изв. вузов. пищ. технология. 1999. № 4. С. 67.
5. Самаров А. А., Володина Н. Ю., Приходько И. В., Тойкка А. М. Фазовое равновесие в системах трет-бутанол-метил-трет-бутиловый эфир с глубокими эвтектическими растворителями на основе хлорида холина // Тонкие химические технологии. 2026. Т. 21. № 1. С. 7.
6. Романова В. В., Абиев Р. Ш. Исследование массопереноса в системе жидкость-жидкость в микроканалах: роль частоты циркуляции // Тез. докл. ПАХТ-2025. Материалы Международного научно-практического семинара, посвященного 100-летию со дня рождения Ю. И. Дытнерского. М.: Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, 2025. С. 471.
7. Романова В. В., Абиев Р. Ш. Исследование массообмена в двухфазном потоке при снарядном режиме течения системы жидкость-жидкость в микрореакторе // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2025. № 72. С. 73
8. Лаптев А. Г. Модели переноса и эффективность жидкостной экстракции. Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2005.
9. Phillip C. Wankat. Separation process engineering: includes mass transfer analysis. 3rd. Edition. Westford: Pearson Education, 2012.
10. Беренгартен М. Г., Козин Ю. В.. Экспериментальное изучение структуры потоков в тарельчато-насадочных колонных экстракторах // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2022. Том 84. № 2. С. 228.
11. Козин Ю. В., Беренгартен М. Г. Разработка новой конструкции жидкостного экстрактора колонного типа // Промышленные процессы и технологии. 2024. Том 4. № 1 (11). С. 77.

12. Беренгартен М. Г., Козин Ю. В. Жидкостный экстрактор колонного типа. Пат. 213134 РФ. 2022.

References

1. Karpeev S. V. (2020) Calculation of the extraction process in a liquid-liquid system. Patent 2020613676 RF.
2. Karpov S. A., Brendakov V. N., Ivanov K. A. and Zhuravlev A. A. (2021) 'Mathematical model of a pulsating extraction column', Bulletin of the National Research Nuclear University MEPhI, 10 (2), p. 168.
3. Laptev A. G., Danilov V. A. and Ayupov L. G. (2004) 'Model of the extraction process on a sieve plate taking into account the features of phase interaction', Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 38 (5), p. 532.
4. Koshevoi E. P., Blyagoz Kh. R., Siyukhov, Kh. R., Skhalyakhov A. A. and Chundyshko V. Yu. (1999) 'Universal unit for carbon dioxide extraction', Proceedings of Universities. Food Technology, (4), p. 67.
5. Samarov A. A., Volodina N. Yu., Prikhod'ko I. V. and Toikka A. M. (2026) 'Phase equilibrium in tert-butanol — methyl tert-butyl ether systems with deep eutectic solvents based on choline chloride', Fine Chemical Technologies, 21 (1), p. 7.
6. Romanova V. V. and Abiev R. Sh. (2025) 'Study of mass transfer in a liquid-liquid system in microchannels: the role of circulation frequency', in Abstracts of PAKhT-2025. Proceedings of the International Scientific and Practical Seminar dedicated to the 100th anniversary of the birth of Yu. I. Dytnersky. Moscow: Russian Chemical-Technological University named after D. I. Mendeleev, p. 471.
7. Romanova V. V. and Abiev R. Sh. (2025) 'Study of mass transfer in a two-phase flow under slug flow regime of a liquid-liquid system in a microreactor', Proceedings of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University), (72), p.
8. Laptev A. G. (2005) Transport models and efficiency of liquid extraction. Kazan: Kazan State Power Engineering University.
9. Wankat P. C. (2012) Separation process engineering: includes mass transfer analysis. 3rd edn. Westford: Pearson Education.
10. Berengarten M. G. and Kozin Yu. V. (2022) 'Experimental study of flow structure in tray-packed column extractors', Proceedings of the Voronezh State University of Engineering Technologies, 84 (2), p. 228.
11. Kozin Yu. V. and Berengarten M. G. (2024) 'Development of a new design of a column-type liquid extractor', Industrial Processes and Technologies, 4 (1/11), p. 77.
12. Berengarten M. G. and Kozin Yu. V. (2022) Column-type liquid extractor. Patent 213134 RF.

Информация об авторах

Козин Юрий Васильевич, *соискатель, специалист по обеспечению образовательного процесса, кафедра химических технологий, Рязанский государственный радиотехнический университет имени В. Ф. Уткина; 390005, Россия, г. Рязань, ул. Гагарина, 59/1; SPIN-код: 8863–6675, Author ID (РИНЦ): 1102297, ORCID: 0000-0002-8230-0503; e-mail: yura_kozin@mail.ru.*

Беренгартен Михаил Георгиевич, *кандидат химических наук, профессор кафедры аппаратурного оформления и автоматизации технологических производств, Московский политехнический университет (Московский Политех), 107023, Россия, г. Москва, ул. Большая Семеновская, д. 38; SPIN-код: 2986–5705, Author ID (РИНЦ): 52408, ORCID: 0000-0002-0282-8202; e-mail: berengarten@mail.ru.*

Information about the authors

Kozin Yuri Vasilyevich, *PhD Candidate, Specialist in Educational Process Support, Department of Chemical Technologies, Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin; 59/1 Gagarina St., Ryazan, 390005, Russia; SPIN-code: 8863–6675, Author ID (RSCI): 1102297, ORCID: 0000-0002-8230-0503; e-mail: yura_kozin@mail.ru.*

Berengarten Mikhail Georgievich, *PhD in Chemistry, Professor of the Department of Equipment Design and Automation of Technological Productions, Moscow Polytechnic University (Moscow Polytech), 38 Bolshaya Semenovskaya St., Moscow, 107023, Russia; SPIN-code: 2986–5705, Author ID (RSCI): 52408, ORCID: 0000-0002-0282-8202; e-mail: berengarten@mail.ru.*