

УДК 66.048.3.069.833

DOI: [10.26102/2310-6018/2021.32.1.022](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2021.32.1.022)

## Математическое моделирование колпачковой тарелки в процессах ректификации

**А.Б. Голованчиков, Н.А. Прохоренко, К.В. Черикова**

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация*

**Резюме.** В данной статье описана разработанная конструкция колпачковой тарелки, в которой колпачок выполнен с помощью конической пружины, что позволяет под действием восходящего потока газа и нисходящего потока жидкости приводить в колебательный динамический режим. Это, в свою очередь, позволяет интенсифицировать процесс массопереноса, а значит и повышает производительность. Приведено математическое моделирование расчета упругости и частоты колебаний конической пружины. Показано, как резонансные частоты заставляют колпачок колебаться с высокой амплитудой, что интенсифицирует тепломассообменные процессы между жидкостью и газами (паром), и таким образом увеличивают производительность. Кроме того, раскачивание колпачков на конической пружине под действием выходящих из прорезей колпачков паровой (газовой) фазы также способствует разрушению пограничного слоя и увеличивает скорость тепло- и массопереноса, что дополнительно способствует росту производительности. Приводится пример расчета вышеназванных параметров и моделирования по типовым и комбинированным моделям: ячеечной, однопараметрической диффузионной и с последовательным соединением зон вытеснения и смешения. Разработанная конструкция может найти применение в химической, нефтехимической, газовой, пищевой, фармацевтической, энергетической и других отраслях промышленности, а также в экологических процессах разделения растворов и газов в процессах ректификации, абсорбции, экстракции и промывки газов.

**Ключевые слова:** резонанс, математическое моделирование, частоты колебаний, интенсификация, колпачковая тарелка, ректификация, массообменные процессы, пружина.

**Для цитирования:** Голованчиков А.Б., Прохоренко Н.А., Черикова К.В. Математическое моделирование колпачковой тарелки в процессах ректификации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2021;9(1). Доступно по: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=924> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.022

## Mathematical modeling of bubble cap trays in rectification processes

**A.B. Golovanchikov, N.A. Prokhorenko, K.V. Cherkova**

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
Volgograd State Technical University,  
Volgograd, Russian Federation*

**Abstract:** The developed design of a bubble cap tray is described, in which the cap is made with the help of a conical spring, which will allow, under the action of an ascending gas flow and a descending liquid flow, to bring it into an oscillatory dynamic mode. It will allow intensifying the process of mass transfer, and therefore will increase productivity. Mathematical modeling of calculation of elasticity and vibration frequency of a conical spring is presented. It is shown that resonant frequencies cause the cap to vibrate with a high amplitude, which intensifies heat and mass transfer processes between liquid and gases

(steam) and increases productivity. Caps rocking on the conical spring under the action of the caps of the vapor (gas) phase emerging from the slots also contributes to the destruction of the boundary layer and increases the rate of heat and mass transfer, which additionally contributes to an increase in productivity. The calculation of the above parameters and modeling according to standard and combined models is given: cell, one-parameter diffusion, and a series connection of zones of displacement and mixing. The developed design can find application in chemical, petrochemical, gas, food, pharmaceutical, energy, and other industries, as well as in ecological processes of solute partitioning of and gases in the processes of rectification, absorption, extraction, and washing of gases.

**Keywords:** resonance, mathematical modeling, vibration frequencies, intensification, bubble cap tray, rectification, mass transfer processes, spring.

**For citation:** Golovanchikov A.B. Prokhorenko N.A. Cherikova K.V. Mathematical modeling of bubble cap trays in rectification processes. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2021;9(1). Available from: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=924> DOI: 10.26102/2310-6018/2021.32.1.022 (In Russ).

## Введение

Главным преимуществом колонны с колпачковыми тарелками по сравнению с насадочной колонной является тот факт, что ей не требуется точная настройка и баланс между подачей пара и флегмообразованием — тарелка в любом случае заполнится и выйдет в рабочее состояние. При правильном расчёте и изготовлении, захлёб на колпачковой тарельчатой колонне практически исключён. Второе преимущество колпачковой колонны — высокая производительность. Если в насадочных колоннах есть ограничение по диаметру колонны (он не должен превышать 40-50 мм, иначе работа будет нестабильной и возможен захлёб), то для колпачковой тарелки диаметр колонны может быть больше и производительность будет ограничена только мощностью нагревательного элемента и дефлегматора[1-6].

Целью работы является разработка и численное моделирование перспективной конструкции колпачковой тарелки, которая может быть использована при проектировании процессов ректификации.

## Разработанное техническое решение

На Рисунке 1 представлена схема предлагаемой конструкции тарелки в разрезе, на Рисунке 2 - вид сверху.

Тарелка состоит из плиты 1 с расположенными на ней паровыми патрубками 2 и колпачками 3 над этими патрубками, коническими пружинами 4, переливными трубами 5, равномерно распределенными между паровыми патрубками 2 на плите 1 тарелки, причем длина каждой переливной трубы 5 выбирается в соответствии с выражением:

$$\frac{l}{H} = 0,4 \div 0,6, \quad (1)$$

где  $l$  – длина переливной трубы, м;  $H$  – расстояние между тарелками, м.

Каждая переливная труба 5 снабжена в нижней части распылителем жидкости 6.

Прикрепление колпачка к паровому патрубку с помощью конической пружины позволяет значительно упростить конструкцию, так как не нужно будет делать жесткое закрепление к паровому патрубку. Также позволит под действием восходящего потока газа и нисходящего потока жидкости приводить колпачок на конической пружине в колебательный динамический режим, что значительно интенсифицирует процесс массопереноса и тем самым увеличивает производительность.

Конические пружины обладают переменной упругостью, изменяющейся в широком диапазоне, это способствует совпадению частот вынужденных колебаний, с

которыми восходящий поток газа воздействует на колпачок, с собственным диапазоном частот колебаний конических пружин, определяемым по формуле:

$$v_n = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\frac{a}{m}}, \quad (2)$$

где  $a$  - упругость конической пружины, Н/м;  $m$  - масса колпачка, кг [7-9].

Такие колебания колпачка с высокой амплитудой вызывают такие же высокие колебания в жидкости, которая будет тиксотропно разжижаться, ее структура разрушается, а эффективная вязкость неньютоновских жидкостей значительно снижается. Это приводит к интенсификации массообмена на границе поверхностей жидкости и газа и в также способствует целом увеличению производительности.

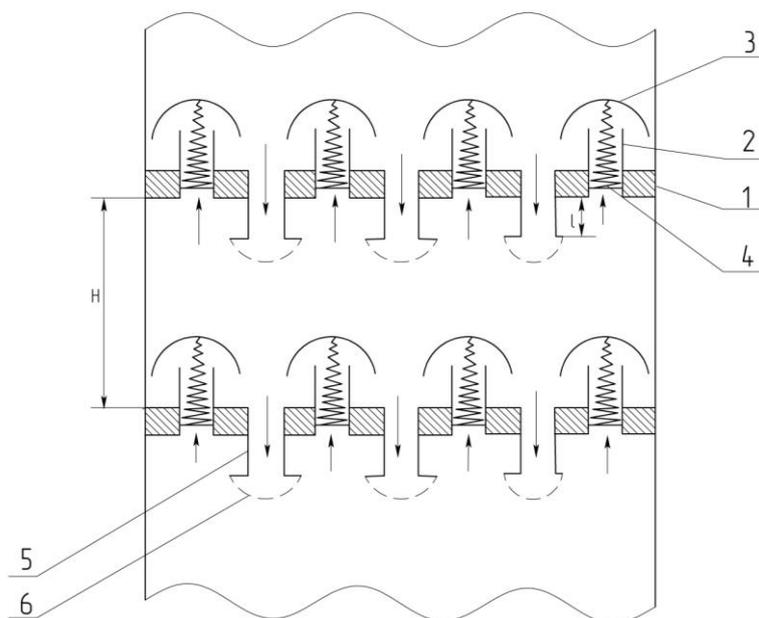


Рисунок 1 - Общий вид в разрезе колпачковой тарелки  
 Figure 1 - General sectional view of the bubble cap tray

### Принцип действия разработанной конструкции

Колпачковая тарелка работает следующим образом. С вышележащей тарелки по переливным трубам 5 стекает жидкость и в виде капель, образующихся на выходе из распылителя жидкости 6, попадает на нижележащую плиту 1 тарелки, образуя на ней слой жидкости.

Газ (пар), поднимаясь снизу вверх проходит по паровым патрубкам 2 с коническими пружинами 4, образуются в колпачках 3 пузырьки пара, которые, барботируя через слой жидкости на плите 1, поднимаются вверх к вышележащей тарелке. При этом колпачок 3 с помощью конической пружины 4 начинает вибрировать, увеличивая при этом барботаж верхнего слоя.

Капли жидкости, образующиеся на выходе из распределителя 6, подаются сверху вниз навстречу сплошной паровой фазе, при этом идет интенсивный тепло- и массообмен между тарелками.

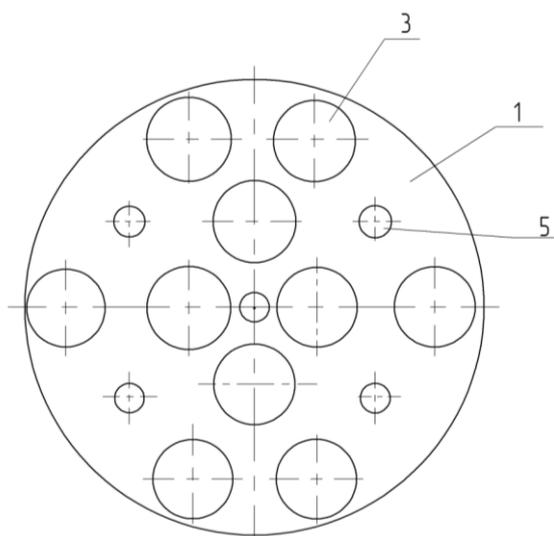


Рисунок 2 - Вид сверху на колпачковую тарелку  
Figure 2 - Top view of the bubble cap dish

### Результаты расчетов

Предоставляем пример, подтверждающий достижение заявляемого технического результата, а также существенность отличительных признаков в заявляемой конструкции колпачковой тарелки, а именно прикрепление колпачка к паровому патрубку с помощью конической пружины.

Известен положительный результат создания акустических колебаний в теплообменниках. Например, пульсации газовых пузырьков позволяют в 2-3 раза увеличить скорость массопередачи [10], а значит увеличить производительность, то есть заявленного технического результата. На странице 163 этого же источника информации сказано, что для получения наилучшего эффекта, необходимо подбирать частоту акустических колебаний, близкой к резонансным колебаниям.

Пример расчета конической пружины, прикрепляемой к паровому патрубку.

В справочнике [11] на странице 542 приведено описание геометрических и динамических параметров цилиндрических пружин сжатия. В нашей Таблице 1 мы приводим часть этих параметров для проектируемой конической пружины, изготавливаемой из проволоки диаметром 1 мм с различным наружным диаметром витков  $D$ , соответствующим им усилиям  $P$ , и деформация сжатия одного витка  $f$ .

Таблица 1- Заданные параметры усилий и деформаций одного витка от наружного диаметра и расчетные значения упругости и собственной частоты колебаний

№	$D$ , мм	$P$ , кг	$f$ , мм	$a$ , Н/м	$\nu$ , Гц
1	7	3,03	0,65	$45,8 \cdot 10^3$	71,7
2	8	2,70	0,93	$28,5 \cdot 10^3$	56,5
3	10	2,18	1,59	$13,5 \cdot 10^3$	39,0
4	12	1,83	2,44	$7,36 \cdot 10^3$	28,6

По исходным данным Таблицы 1 определим упругость (жесткость)  $a$  витков пружины заданного наружного диаметра по формуле:

$$a = \left( \frac{P_1}{f_1} \right) \left( \frac{9,81}{10^{-3}} \right), \quad (3)$$

где 9,81 – коэффициент перевода усилий  $P_1$  из килограммов в ньютоны, а  $10^{-3}$  – перевод миллиметров в метры.

Результаты расчетов упругости  $a$ , по формуле (3) представлены в Таблице 1.

Определим ориентировочную массу колпачка  $m_1$ , прикрепленного к паровому (газовому) патрубку конической пружины. Если колпачок представляет собой полусферу диаметром  $d=100$  мм и изготовлен из стали толщиной  $\delta = 2$  мм, то его масса составит:

$$m_1 = \rho \left( \frac{\pi d^2}{2} \right) \delta \approx 0,25 \text{ кг},$$

где  $\rho = 8000$  кг/м<sup>3</sup>, плотность стального листа, из которого сделан колпачок;

$\frac{\pi d^2}{2}$  - поверхность полусферы.

С учетом прорезей в нижней части колпачка, через которые барботирует пар или газ:

$$m = 0,228 \text{ кг}.$$

Колпачок, массой  $m$  закрепленный на конической пружине, представляет собой маятник, имеющий собственную частоту колебаний  $\nu$ , описываемую формулой:

$$\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{a}{m}} [12-14]. \quad (4)$$

Результаты расчетов собственной частоты колебаний  $\nu$ , по формуле (4) также приведены в Таблице 1.

Таким образом, коническая пружина с витком в основании с наружным диаметром  $D=12$  мм, имеет собственную частоту колебаний  $\nu = 28,6$  Гц, а с верхним витком, прикрепленном к колпачку с наружным диаметром  $D=7$  мм, имеет собственную частоту колебаний  $\nu = 71,7$  Гц.

Спроецируем коническую пружину высотой  $H=60$  мм с зазором между витками (шагом)  $\Delta=3$  мм, из проволоки толщиной  $\delta=1$  мм (Рисунок 3).

Число витков определяется по формуле:

$$n = \frac{H}{\Delta} \approx \frac{60}{3} \approx 20$$

Построим график зависимости собственной частоты колебаний  $\nu$  от наружного диаметра  $D$  витка конической пружины по данным Таблицы 1. Здесь же под осью абсцисс  $D$  изобразим ось  $n$  от одного витка до 20, соответствующую номеру витка в конической пружине (Рисунок 4).

Полагаем, что число оборотов  $\omega$  центробежного насоса подающего исходную смесь на первую колпачковую тарелку исчерпывающей части ректификационной колонны или флегму на первую колпачковую тарелку укрепляющей части колонны:

$$\omega = 500 \text{ об/мин} = 52,3 \text{ рад/с или } \omega = 52,3 \text{ Гц}.$$

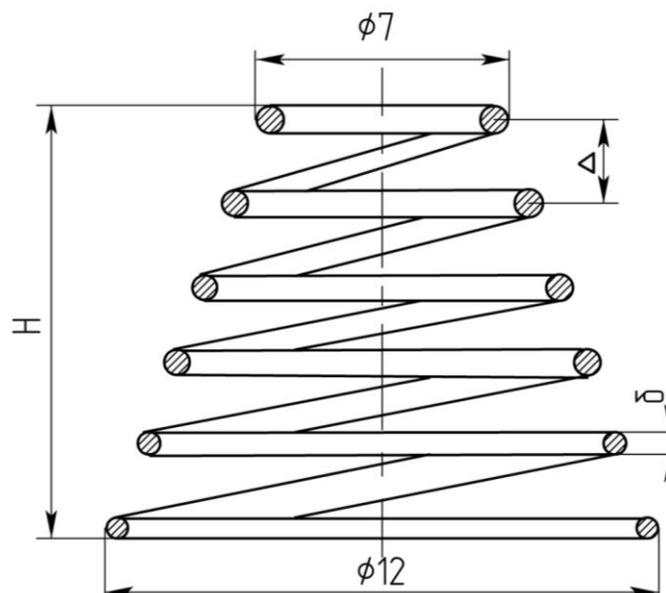


Рисунок 3 - Схема проектируемой конической пружины в разрезе  
 Figure 3 - Sectional diagram of the designed conical spring

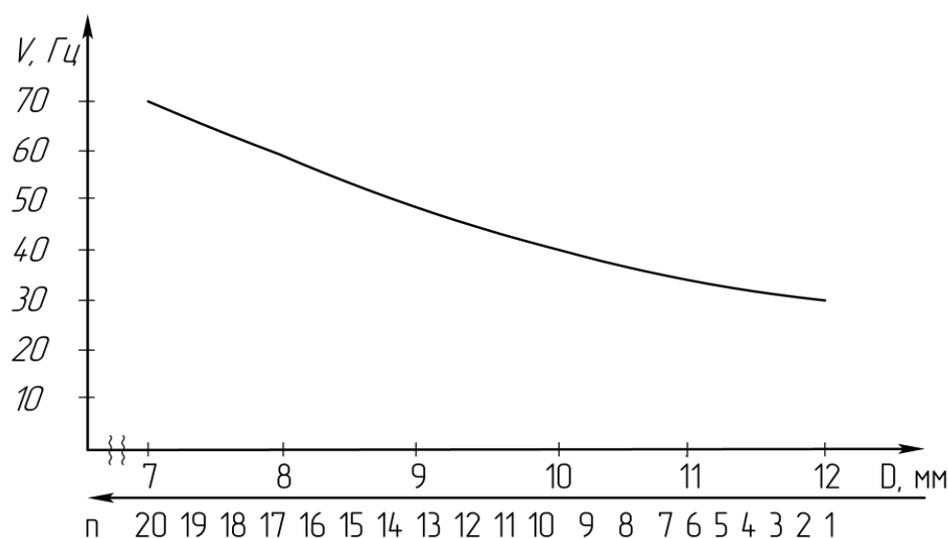


Рисунок 4 - Зависимость собственной частоты колебаний  
 витков конической пружины от наружного диаметра витка и номера витка  $n$   
 Figure 4 - Dependence of natural vibration frequency  
 coils of a conical spring from the outer diameter of the coil  $D$  and the coil number  $n$

То есть вынужденная частота колебаний подачи жидкой фазы составляет – 52,3 Гц. Тоже можно сказать о подаче жидкости центробежным насосом на колпачковые тарелки в верхнюю часть ректификационной колонны или подачу газовой фазы компрессором в нижнюю часть ректификационной колонны. В конической пружине (Рисунок 3) такую собственную частоту колебаний  $\nu = \omega$  будут иметь витки №14 и №15 с наружным диаметром  $D=8,5$  мм. Также резонансные частоты (или близкие к ним) заставляют колпачок колебаться с высокой амплитудой, что интенсифицирует тепломассообменные процессы между жидкостью и газами (паром), а значит, увеличивают производительность.

Была разработана программа на ЭВМ, позволяющая провести расчет по типовой

конструкции колпачковой тарелки и для разработанной конструкции колпачковой тарелки, работающей в резонансном режиме. В качестве исследуемой среды использовалась бинарная смесь этиловый спирт -метиловый спирт в ректификационной колонне непрерывного действия. На основании полученных геометрических параметров, была рассчитана производительность, которая показала что колонна, работающая с модернизируемой тарелкой будет увеличивать производительность по дистилляту на 35%.

Кроме того, раскачивание колпачков на конической пружине под действием выходящих из прорезей колпачков паровой (газовой) фазы, также способствует разрушению пограничного слоя и увеличивает скорость тепло- и массопереноса, что дополнительно способствует росту производительности.

### Заключение

После проведения численного моделирования разработанной конструкции колонны для контактирования, можно сделать вывод, что выполнение колпачка 3, прикреплённого к паровому патрубку 2 с помощью конической пружины 4, позволит под действием восходящего потока газа и нисходящего потока жидкости приводить колпачок 3 на конической пружине 4 в колебательный динамический режим. Расчеты на разработанной программе ЭВМ показали, что установка пружины интенсифицирует процесс массопереноса, а значит и повышает производительность на 35%.

### Благодарности

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90002.*

### ЛИТЕРАТУРА

1. Багатуров С.А. Основы теории и расчета перегонки и ректификации. ИД «Химия». 1974.
2. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов. ИД «Альянс». 2005.
3. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. ИД «Химия». 1987.
4. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры, ИД «Москва». 1963.
5. Сокол Б.А., Чернышов А.К., Баранов Д.А. Насадки массообменных колонн. ИД «Инфохим» 2009.
6. Левеншпиль О. Инженерное оформление химических процессов. ИД «Химия». 1969.
7. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. ИД «Химия». 1968.
8. Закгейм А.Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов. ИД «Химия». 1982.
9. Голованчиков А. Б., Карев В.Н., Прохоренко Н.А. Simulation of Rectification Process Taking into Account Longitudinal Diffusion on Equations of Working Lines. *Springer Nature Switzerland AG, ser.: Lecture Notes in Mechanical Engineering*. 2020;1(1):441-449.
10. Жуков В. П., Беляков А.Н. Моделирование совмещенных гетерогенных процессов на основе дискретных модулей уравнения Больцмана. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*. 2017;51(1):78-84.
11. Скобло А.И. Процессы и аппараты нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. ИД «Химия». 1982.

12. Б.Г. Новицкий Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах. ИД «Химия». 1983.
13. В.И. Анурьевой Справочник конструктора – машиностроителя. Издание 3-е, переработанное и дополненное. ИД «Машиностроение». 1967.
14. Б.М. Яворский, А.А. Детлаф Справочник по физике. ИД «Наука». 1985.

## REFERENCES

1. Bagaturov S.A. Fundamentals of theory and calculation of distillation and rectification. Publishing House "Chemistry". 1974.
2. Pavlov KF, Romankov PG, Noskov AA Examples and tasks for the course of processes and apparatuses of chemical technology: textbook. manual for universities. Publishing House "Alliance". 2005.
3. Planovsky A.N., Nikolaev P.I. Processes and devices of chemical and petrochemical technology. Publishing House "Chemistry". 1987.
4. Lashchinsky A.A., Tolchinsky A.R. Fundamentals of design and calculation of chemical equipment, Publishing House "Moscow". 1963.
5. Sokol B.A., Chernyshov A.K., Baranov D.A. Mass transfer column packing. Publishing House Infohim 2009.
6. Levenshpil O. Engineering registration of chemical processes. Publishing House "Chemistry". 1969.
7. Kafarov V.V. Cybernetics methods in chemistry and chemical technology. Publishing House "Chemistry". 1968.
8. Zakgeym A.Yu. Introduction to the modeling of chemical engineering processes. Publishing House "Chemistry". 1982.
9. Golovanchikov A.B., Karev V.N., Prokhorenko N.A. Simulation of Rectification Process Taking into Account Longitudinal Diffusion on Equations of Working Lines. Springer Nature Switzerland AG, ser .: Lecture Notes in Mechanical Engineering. 2020; 1 (1): 441-449.
10. Zhukov V. P., Belyakov A. N. Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete modules of the Boltzmann equation. Theoretical Foundation of Chemical Engineering. 2017; 51 (1): 78-84.
11. Skoblo A.I. Processes and devices of the oil refining and petrochemical industries. Publishing House "Chemistry". 1982.
12. B.G. Novitsky Application of acoustic vibrations in chemical-technological processes. Publishing House "Chemistry". 1983.
13. V.I. Anuryeva Handbook of the constructor - mechanical engineer. 3rd edition, revised and enlarged. Publishing House "Mechanical Engineering". 1967.
14. B.M. Yavorsky, A.A. Detlaf Physics Handbook. Publishing House "Science". 1985.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Прохоренко Наталья Андреевна**, аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.  
*e-mail:* [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)  
ORCID: [0000-0002-5706-1475](https://orcid.org/0000-0002-5706-1475)

**Natalya A. Prokhorenko**, PhD Student, Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

**Голованчиков Александр Борисович**, д-р. тех. наук, профессор, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.

*e-mail:* [natasha292009@yandex.ru](mailto:natasha292009@yandex.ru)

ORCID: [0000-0002-4576-4229](https://orcid.org/0000-0002-4576-4229)

**Alexander B. Golovanchikov**, Dr. those. Sci., Professor, Department of Processes and Apparatus for Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.

**Черикова Ксения Васильевна**, аспирант, кафедра «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», ФГБОУ ВО "Волгоградский государственный технический университет", Волгоград, Российская Федерация.

*e-mail:* [tchyorickowa.xenia@yandex.ru](mailto:tchyorickowa.xenia@yandex.ru)

**Ksenia V. Cherikova**, PhD Student, Department of Processes and Devices of Chemical and Food Production, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation.