

## К вопросу развития исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности

Александр Б. Емельянов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:okipr-mip@mail.ru">okipr-mip@mail.ru</a>
Никита Р. Кононов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nikita.cononow@yandex.ru">nikita.cononow@yandex.ru</a>
Сухрап Юсупов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:suhrap01@mail.ru">suhrap01@mail.ru</a>
Александр А. Мягков	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nitro-fox@yandex.ru">nitro-fox@yandex.ru</a>

<sup>1</sup> Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия

**Реферат.** Сушка – процесс, часто применяемый в химической и пищевой промышленности. Ему сопутствуют большие энергозатраты, в связи с этим становится вопрос изыскания путей по снижению энергопотребления в процессе сушки. Это достигается благодаря поиску наиболее энергозатратных периодов сушки и способов их интенсификации. Изучение кинетики процесса сушки позволяет выявить соответствующие участки и дать оценку эффективности энергопотребления на них. Так в теории кинетики сушки появились кривые сушки и кривые скорости сушки. Данные кривые носят качественный характер и не дают полного представления о протекании процесса в целом, однако показатель скорости сушки является важным звеном в процедуре его моделирования. Для дальнейшего и более глубокого анализа кинетики процесса сушки в химической и пищевой промышленности может быть применен термин «ускорение сушки». Это величина, определяющая быстроту изменения скорости сушки, то есть первая производная от скорости сушки по времени или вторая производная по влажности. Результат внедрения в теорию кинетики сушки такой величины как ускорение сушки позволит вычислять время требуемое на сушку. По мимо этого, полученные графики ускорения сушки могут быть использованы для нахождения периодов с максимальными энергозатратами, что в перспективе поможет их минимизировать. Ускорение сушки позволяет более полно охарактеризовать период падающей скорости сушки, дать количественную оценку изменения скорости сушки и может использоваться при анализе кинетики снижения энергозатрат, а так же быть полезным при развитии исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности.

**Ключевые слова:** Кинетика процесса сушки, скорость сушки, ускорение сушки.

## On the development of research on resource and energy-saving processes in the chemical and related industries

Aleksandr B. Emelyjanov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:okipr-mip@mail.ru">okipr-mip@mail.ru</a>
Nikita R. Kononov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nikita.cononow@yandex.ru">nikita.cononow@yandex.ru</a>
Suhrap Yusupov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:suhrap01@mail.ru">suhrap01@mail.ru</a>
Aleksandr A. Myagkov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:nitro-fox@yandex.ru">nitro-fox@yandex.ru</a>

<sup>1</sup> Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia

**Summary.** Drying is a process often used in chemical and food industry. This process requires a lot of energy, that's why it is necessary to search new ways for reduce energy consumption in the process of drying. This is achieved by finding the most energy intensive periods of drying and development of methods for their intensification. The exploration of the kinetics of the drying process let's find out specific areas and to assess energy efficiency. That's why in the theory of the kinetics of drying arose curves of drying and curves of drying speed. These curves don't give full vision of the passage of the drying process, but drying speed is important part of the procedure for its simulation. For further analysis of the kinetics of the drying process in chemical and food industry can be used the term of «accelerated drying». This value determines quickness changes of the drying speed this means that it is the first derivative of the drying speed by time or the second derivative by humidity. The result of introduction into the theory of the kinetics of drying such magnitude as accelerated drying will calculate the time required for drying. By this, the obtained curves of accelerated drying can be used for find the periods with the maximum energy consumption, which in term can help to minimize them. The accelerated drying allows described period of falling drying speed more fully, to assess drying speed changes and can be used in analysis of the kinetics of energy reduction, as well as be useful in the development of resource - saving research processes in chemical and allied industries.

**Keywords:** Kinetics of the drying process, drying speed, accelerate drying.

### Введение

Процесс сушки нашел широкое применение в химической и пищевой промышленности. Высушенный продукт имеет ряд полезных свойств, таких как: меньшая подверженность порче, простота в упаковывание и транспортировке, сохранение, при определенных режимах и способах сушки, своих вкусовых и биологических качеств. Эти особенности позволяют

изготовить изделие, способное храниться на протяжении относительно долгого промежутка времени, будучи максимально компактным и сохранять качества изначального продукта. Процесс сушки в химической и пищевой промышленности применяется для обработки большого количества разнообразного сырья, что делает его важным объектом для изучения. Так как процесс удаления влаги из продукта

#### Для цитирования

Емельянов А.Б., Кононов Н.Р., Юсупов С., Мягков А.А. К вопросу развития исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности // Вестник ВГУИТ. 2017. Т. 79. № 3. С. 148–153. doi:10.20914/2310-1202-2017-3-148-153

#### For citation

Emel'janov A.B., Kononov N.R., Jusupov S., Mjagkov A.A. On the development of research on resource and energy-saving processes in the chemical and related industries. *Vestnik VGUIT* [Proceedings of VSUET]. 2017. vol. 79. no. 3. pp. 148–153. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2017-3-148-153

является крайне сложным из – за множества факторов, влияющих на него, то поиск какого-то одного критерия или уравнения, описывающего весь процесс сушки, становится невозможным. Производителю наиболее важно знать за какое время влажность продукта достигнет необходимой величины. На этот вопрос позволяет ответить кинетика процесса сушки, поскольку она изучает закономерности изменения с течением времени таких величин, как среднее влагосодержание  $\omega(\tau)$

и средняя температура тела  $t(\tau)$ . Принцип, по которому могут меняться значения этих величин, лежит в основе определения количества испаряемой влаги из тела и расхода теплоты на сушку [1, 83 с.]. На основании изменения среднего влагосодержания с течением времени А.В. Лыковым была предложена кривая сушки (рисунок 1), показывающая процентное содержание влаги в продукте в каждый момент времени в процессе сушки [1, 85 с.].

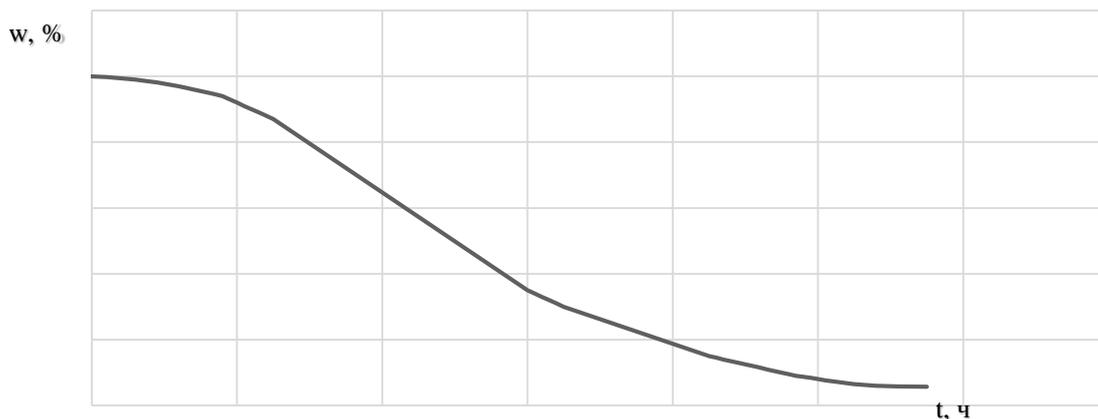


Рисунок 1. Кривая сушки

Figure 1. Curve drying

Графически продифференцировав кривую сушки, получаем кривую скорости сушки, которая демонстрирует значения скорости удаления влаги с течением времени при изменяющейся влажности продукта. Лыков приводит

6 типов кривых скорости сушки, отличающихся поведением кривой на падающем периоде скорости сушки [1, 86–87 с.]. Наиболее простыми кривыми скорости сушки являются 1, 2 и 3 (рисунок 2).

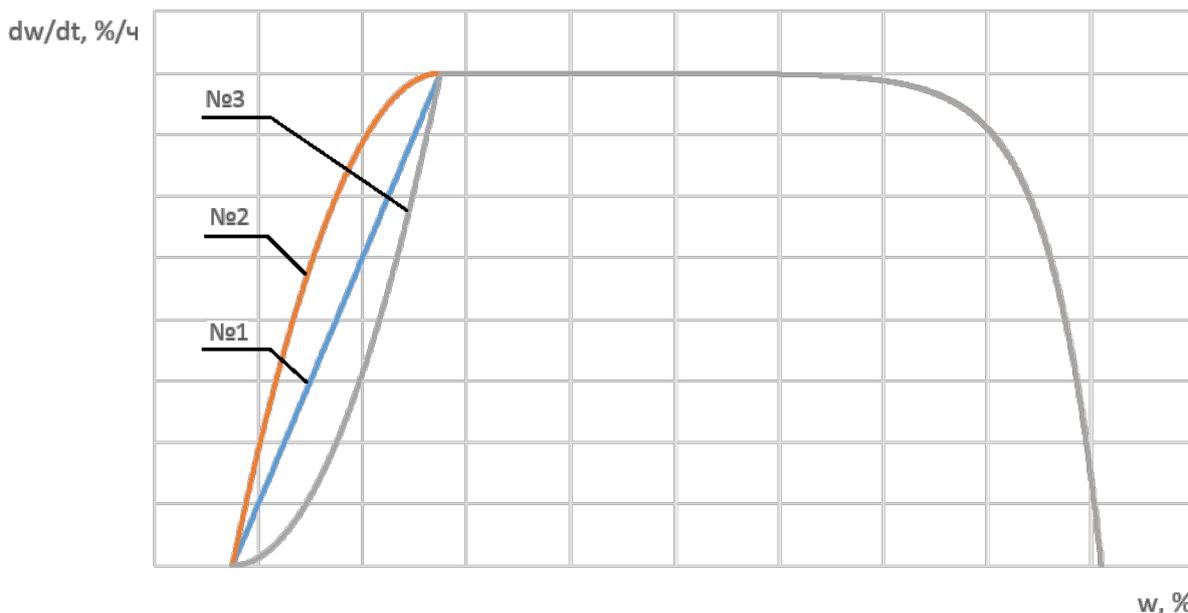


Рисунок 2. Кривые скорости сушки

Figure 2. Drying speed curves

Первая кривая получается при сушке тонких образцов волокнистых материала, таких как бумага или картон, вторая при сушке макаронного теста, тканей, кожи, а третья при сушке пористых керамических материалов.

К более сложным кривым сушки стоит отнести 4, 5 и 6 (рисунок 3), так как на падающем периоде сушки кривая либо несколько раз меняет направление своего изгиба, либо из прямой переходит в кривую.

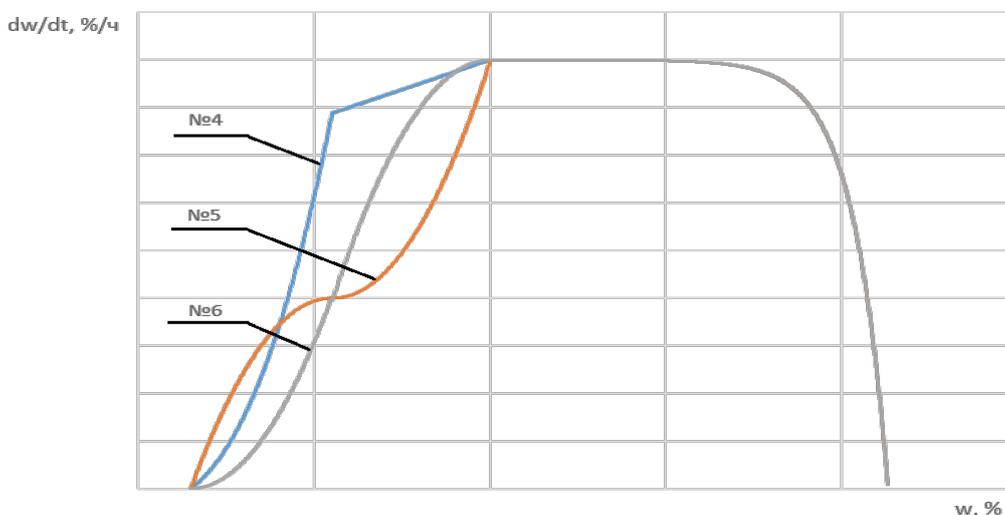


Рисунок 3. Более сложные кривые сушки  
Figure3. More complex drying curves

Кривые 4 характеризуют процесс скорости сушки глины, кривые 5 получают при сушке хлеба, а кривые 6 встречаются на практике крайне редко [1, 86–87 с.].

Представленные кривые скорости сушки носят качественный характер и не дают полного представления о протекании процесса в целом, однако показатель скорости сушки является важным звеном в процедуре его моделирования.

А.С. Гинзбург предложил закон, описывающий изменения скорости сушки при приближенном методе расчета процесса сушки термолабильных материалов в кипящем слое, протекающего с убывающей скоростью [3, 87 с.]. Однако этот закон является только частным случаем, не применимым к другим методам сушки. Для дальнейшего и более глубокого анализа кинетики процесса сушки в химической

и пищевой промышленности может быть применен термин «ускорение сушки». Это величина, определяющая быстроту изменения скорости сушки, то есть первая производная от скорости сушки по времени или вторая производная от влажности [2].

$$A = \frac{d^2\omega}{dt^2}, \quad (1)$$

где  $\omega$  – влажность продукта, %;  $t$  – время процесса сушки, ч.

Получить графическую реализацию данной формулы можно продифференцировав график кривой скорости сушки. Величина ускорения сушки численно равна тангенсу угла наклона касательной к кривой скорости сушки. По средствам графического дифференцирования строим 6 графиков ускорений сушки (рисунок 4–9).

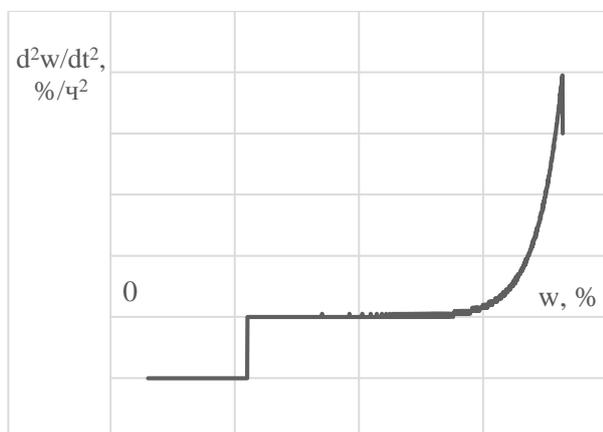


Рисунок 4. Кривая ускорения сушки 1 типа  
Figure4. The acceleration curve of drying type 1

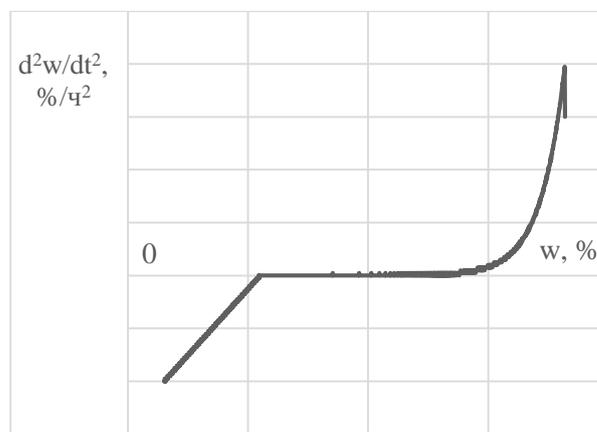


Рисунок 5. Кривая ускорения сушки 2 типа  
Figure5. The acceleration curve of drying type 2

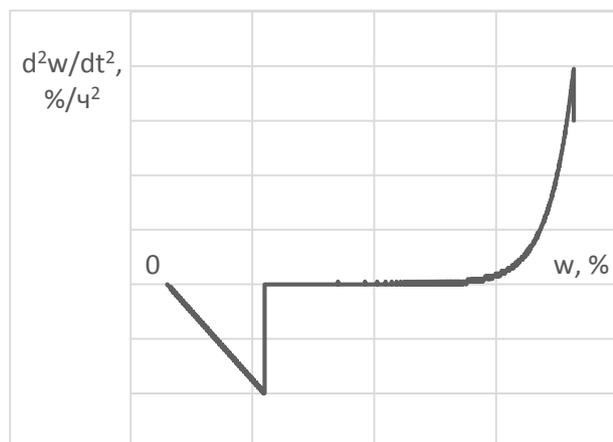


Рисунок 6. Кривая ускорения сушки 3 типа  
Figure 6. The acceleration curve of drying type 3

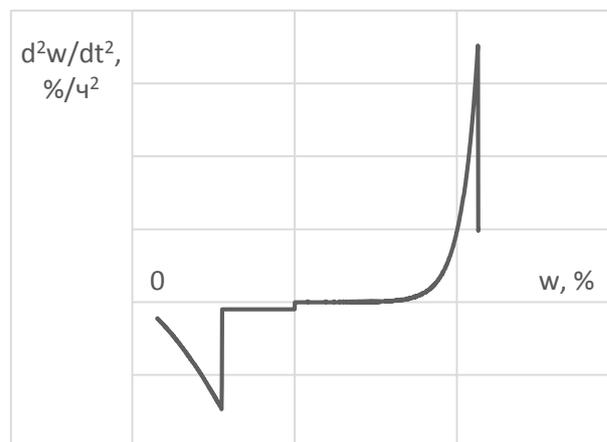


Рисунок 7. Кривая ускорения сушки 4 типа  
Figure 7. The acceleration curve of drying type 4

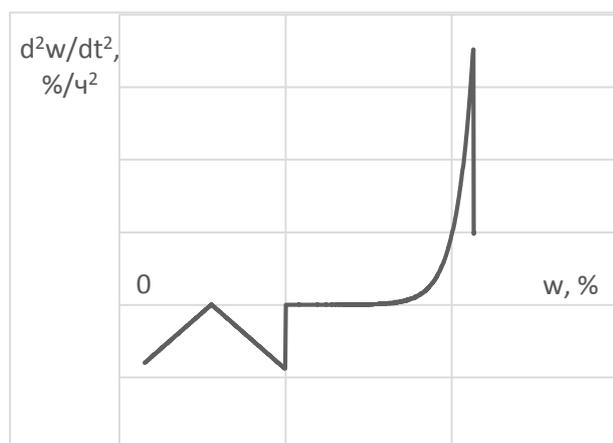


Рисунок 8. Кривая ускорения сушки 5 типа  
Figure 8. The acceleration curve of drying type 5

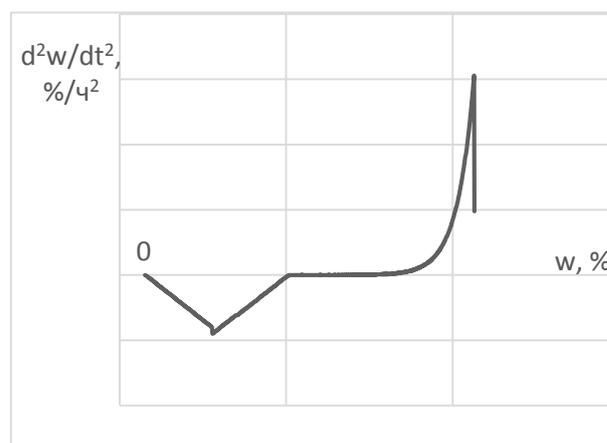


Рисунок 9. Кривая ускорения сушки 6 типа  
Figure 9. The acceleration curve of drying type 6

На полученных графиках точно видно периоды возрастающего и убывающего ускорения сушки. Данные графики читаются также как и графики скорости сушки – справа налево. В период подогрева продукта можно видеть резкий рост ускорения сушки, а за тем его постепенный спад, который переходит в период постоянной скорости сушки, то есть при отсутствии ускорения. Различия в кривых наблюдаются в третьем периоде падающей скорости сушки. В зависимости от свойств высушиваемого материала, ускорение на последнем участке может быть постоянным или переменным, как это видно на кривых ускорения сушки типа 1–3, может из постоянного переходить в переменное, как на кривой ускорения сушки 4 типа, а так же переходить из состояния переменного ускоренного в переменное замедленное, кривая 5 типа, или наоборот, кривая 6 типа.

Результат внедрения в теорию кинетики сушки такой величины как ускорение сушки

позволит на основании данных об ускорении сушки вычислять время, требуемое на сушку с помощью кинетических формул, а также предоставляет обширное поле для дальнейших исследований.

Зная начальную влажность продукта и конечную на определенном участке кривой, а также скорость сушки в начале этого интервала и ускорение в пределах этого промежутка можно вычислить время сушки, выразив его из формулы 2.

$$(\omega_k - \omega_n) = \frac{d\omega}{dt} \cdot t + \frac{d^2\omega}{dt^2} \cdot \frac{t^2}{2} \quad (2)$$

где  $\omega_n$  – начальная влажность продукта, %;  $\omega_k$  – конечная влажность продукта, %.

Помимо этого, полученные графики ускорения сушки могут быть использованы для нахождения периодов с максимальными энергозатратами, что в перспективе поможет их минимизировать.

### Заклучение

Ускорение сушки позволяет более полно охарактеризовать период падающей скорости сушки, на основании чего появляются дополнительные возможности к оценке подходов его интенсификации с целью доведения влажности в продукте до более низкой отметки при тех же энергозатратах.

Ускорение сушки позволяет дать количественную оценку изменения скорости сушки

и может использоваться при анализе кинетики снижения энергозатрат и может быть полезным при развитии исследований ресурсо- и энергосберегающих процессов в химической и смежных отраслях промышленности.

Введение в теорию кинетики сушки такой величины как ускорение сушки, окажется полезным в процессе расчета и моделирования процесса сушки в химической и пищевой промышленности.

### ЛИТЕРАТУРА

1 Емельянов А.Б., Мальцев М.В., Пенкина А.А. Обеспечение экологической безопасности при сушке химических и пищевых продуктов // Системный анализ и моделирование процессов управления качеством в инновационном развитии агропромышленного комплекса. 2017. С. 58–60.

2 Xie K., Li W., Zhao W. Coal chemical industry and its sustainable development in China //Energy. 2010. V. 35. №. 11. P. 4349-4355.

3 Duflou J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach // CIRP Annals-Manufacturing Technology. 2012. V. 61. №. 2. P. 587-609.

4 Li H. et al. Energy conservation and circular economy in China's process industries //Energy. 2010. V. 35. №. 11. P. 4273-4281.

5 Klemeš J. J. et al. Minimising emissions and energy wastage by improved industrial processes and integration of renewable energy //Journal of Cleaner Production. 2010. V. 18. №. 9. P. 843-847.

6 Лыткина Л.И., Шевцов А.А., Курманахынова М.К., Матеев Е.З. Снижение теплоэнергетических затрат энергоемких процессов в технологии комбикормов // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2016. № 1 (67). С. 16-20.

7 Логачева Д.А., Падалкин В.Ю. Проблемы финансирования энергосберегающих мероприятий на промышленных предприятиях // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2012. № 2. С. 180-183.

8 Емельянов А.Б., Мальцев М.В., Попов В.Б. Определение эффективности тарельчатых массообменных аппаратов применяемых в нефтехимическом производстве // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2017. Т. 79. № 2 (72). С. 176-179.

9 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года // Экологический консалтинг. 2010. № 1. С. 12-69.

10 Тарасова Н.П., Макарова А.С., Вавилов С.Ю., Варламова С.Н. и др. Зелёная химия и российская промышленность // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 12. С. 1068-1075.

### REFERENCES

1 Emelyanov A.B., Maltsev M.V., Penkina A.A. Ensuring environmental safety in the drying of chemical and food products. *Sistemnyi analiz i modelirovanie* [System analysis and modeling of quality management processes in the innovative development of the agro-industrial complex] 2017. pp. 58-60. (in Russian)

2 Xie K., Li W., Zhao W. Coal chemical industry and its sustainable development in China. *Energy*. 2010. vol. 35. no. 11. pp. 4349-4355.

3 Duflou J. R. et al. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2012. vol. 61. no. 2. pp. 587-609.

4 Li H. et al. Energy conservation and circular economy in China's process industries. *Energy*. 2010. vol. 35. no. 11. pp. 4273-4281.

5 Klemeš J. J. et al. Minimising emissions and energy wastage by improved industrial processes and integration of renewable energy. *Journal of Cleaner Production*. 2010. vol. 18. no. 9. pp. 843-847.

6 Lytkina L.I., Shevtsov A.A., Kurmanakhynova M.K., Mateev E.Z. Reduction of heat energy costs of energy-intensive processes in mixed feed technology. *Vestnik VGUIT* [Voronezh State University of Engineering Technology] 2016. no. 1 (67). pp. 16-20. (in Russian)

7 Logacheva D.A., Padalkin V.Yu. Problems of financing energy-saving measures at industrial enterprises. *Vestnik VGUIT* [Voronezh State University of Engineering Technology]. 2012. no. 2. pp. 180-183. (in Russian)

8 Emelyanov A.B., Maltsev M.V., Popov V.B. Determination of the effectiveness of plate-type mass transfer apparatus used in petrochemical production. *Vestnik VGUIT* [Voronezh State University of Engineering Technology]. 2017. vol. 79. no. 2 (72). pp. 176-179. (in Russian)

9 Energy Strategy of Russia for the period until 2030. *Ekologicheskii konsalting* [Ecological Consulting] 2010. no. 1. pp. 12-69. (in Russian)

10 Tarasova N.P., Makarova A.S., Vavilov S.Yu., Varlamova S.N. Green chemistry and Russian industry. *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences] 2013. vol. 83. no. 12. pp. 1068-1075 (in Russian).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Александр Б. Емельянов** к.т.н., доцент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, okipr-mip@mail.ru

**Никита Р. Кононов** студент, кафедра машин и аппаратов пищевых производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nikita.cononow@yandex.ru

**Сухран Юсупов** студент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, suhrap01@mail.ru

**Александр А. Мягков** студент, кафедра машин и аппаратов химических производств, Воронежский государственный университет инженерных технологий, пр-т Революции, 19, г. Воронеж, 394036, Россия, nitro-fox@yandex.ru

#### КРИТЕРИЙ АВТОРСТВА

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**ПОСТУПИЛА 01.07.2017**

**ПРИНЯТА В ПЕЧАТЬ 10.09.2017**

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

**Aleksandr B. Emelyjanov** candidate of technical sciences, assistant professor, machines and apparatus of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, okipr-mip@mail.ru

**Nikita R. Kononov** student, machines and apparatus of food production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nikita.cononow@yandex.ru

**Suhrap Yusupov** student, machines and apparatus of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, suhrap01@mail.ru

**Aleksandr A. Myagkov** student, machines and apparatus of chemical production department, Voronezh state university of engineering technologies, Revolution Av., 19 Voronezh, 394036, Russia, nitro-fox@yandex.ru

#### CONTRIBUTION

All authors equally took part in writing the manuscript and are responsible for plagiarism

#### CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflict of interest.

**RECEIVED 7.1.2017**

**ACCEPTED 10.9.2017**