

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА КОМПАКТИРОВАНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ ПОРОШКООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М. В. Севостьянов<sup>1</sup>, Т. Н. Ильина<sup>2</sup>, Е. Н. Семерикова<sup>1</sup>

*Кафедры: «Технологические комплексы, машины и механизмы» (1),  
«Теплогазоснабжение и вентиляция» (2), ФГБОУ ВО «Белгородский  
государственный технологический университет им. В. Г. Шухова»,  
г. Белгород, Россия; msev31@mail.ru*

**Ключевые слова:** давление прессования; компактирование; компрессионные кривые; пресс-матрица; степень плотности шихты; техногенные материалы.

**Аннотация:** Обоснована необходимость проведения теоретических и экспериментальных исследований процесса прессования техногенных порошкообразных материалов для конструктивно-технологического совершенствования существующего и создания специального оборудования для компактирования шихт с различными физико-механическими характеристиками. Проведены теоретические исследования процесса компактирования техногенных порошкообразных материалов, получено аналитическое выражение для расчета давления прессования шихты с учетом ее физико-механических характеристик. Установлены общие закономерности процесса компактирования техногенных порошкообразных материалов и выработаны рекомендации для проектирования специального оборудования.

---

Одним из приоритетных направлений развития отечественной индустрии является рациональное использование природных ресурсов и комплексная переработка вторичных материалов с различными физико-механическими характеристиками [1, 2]. К числу наиболее экономически эффективных способов утилизации техногенных материалов (ТМ) относятся способы компактирования (брикетирование, экструдирование, микрогранулирование, прокатка и др.). Проведенные исследования отечественных и зарубежных ученых [3 – 9] заложили основы дальнейшего развития процессов агломерации полидисперсных систем.

Однако для дальнейшего конструктивно-технологического совершенствования существующих машин и агрегатов, не учитывающих специфические особенности ТМ (низкую насыпную массу, малую сыпучесть, склонность к слеживанию, полифракционность состава, различия в адгезионной способности и др.), а также для создания нового специального оборудования необходимо изучение процесса компактирования ТМ и его общих закономерностей.

Проведенные экспериментальные исследования процесса прессования различных порошкообразных шихт с помощью компрессионных кривых уплотнения (рис. 1) – зависимости степени плотности шихты  $\eta_w = \frac{\rho_i}{\gamma_{\delta_{p_w}}} \cdot 100\%$  от давления прессования  $\bar{P}(\eta_w = f(\bar{P}_i))$ , где  $\rho_i$ ,  $\gamma_{\delta_{p_w}}$  – исходное и предельное значения плотности с учетом наличия жидкой фазы в прессуемом материале, кг/м<sup>3</sup>, соответственно, позволили установить его общие закономерности.

Несмотря на различие физико-механических свойств исследуемых материалов, их компрессионные кривые уплотнения имеют общую идентичность: интенсивный прирост степени плотности  $\eta_{wi}$  при  $\bar{P} = \min$  на первой стадии уплотнения (участок *AB*), пропорциональный прирост степени плотности с ростом давления прессования на второй (участок *BC*) и незначительный прирост значений  $\eta_{wi}$  при  $\bar{P} = \max$  на третьей (участок *CD*). Аналогичный характер компрессионной кривой уплотнения наблюдается и для порошкообразной древесно-полимерной композиционной смеси (содержание древесной муки – опилок,  $d_{\text{ср.взв}} \leq 2$  мм,  $C_{\text{опил}} = 60$  %; содержание полимерного компонента,  $C_{\text{полимер}} = 40$  %), прессуемой при температуре  $T = 170$  °С.

Анализ полученных компрессионных кривых уплотнения для различных техногенных материалов позволяет установить общие закономерности процесса прессования и выработать рекомендации для проектирования специального оборудования:

1. Наличие достаточно протяженной первой стадии уплотнения, реализуемой при незначительном давлении прессования, обуславливает необходимость создания технических условий для равномерного питания малосыпучей шихты и удаления из нее газообразной фазы.

2. Характерная для техногенных порошкообразных материалов низкая насыпная масса предполагает необходимость предварительного уплотнения шихты с обеспечением широкого диапазона варьирования степени плотности на первой стадии.

3. Интенсивный прирост плотности материала после его предварительного уплотнения требует обеспечения технических условий для регулирования давления прессования и релаксации напряжений в сформованном теле после снятия напряжений.

4. Экспоненциальный характер повышения степени плотности прессуемой шихты на последней стадии ее уплотнения при повышенных энергозатратах (давление прессования) обуславливает необходимость разработки специальных устройств, предохраняющих прессовые агрегаты от поломок при повышенных давлениях прессования и др.

Рассмотрим процесс компактирования порошкообразных шихт с помощью компрессионных кривых (рис. 2). При этом считаем, что в виду незначительных сил аутогезионного взаимодействия частиц в исходном состоянии и связанностью структуры по сравнению с напряжениями, возникающими в спрессованном теле, исходную шихту можно рассматривать как

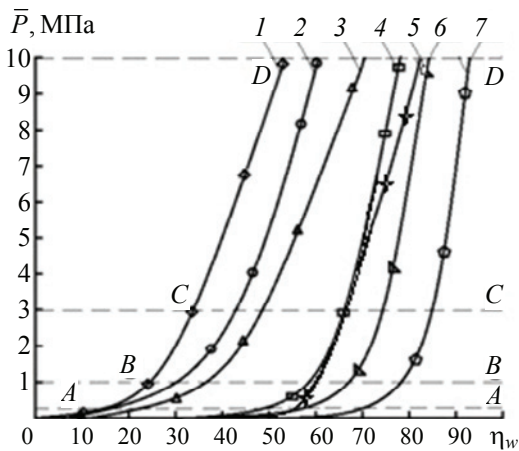


Рис. 1. Зависимости степени плотности  $\eta_{wi}$  уплотняемых шихт от давления прессования  $\bar{P}_i$ :

1 – вспученный перлитовый песок,  $W = 50$  %; 2 – пыль вращающихся печей цементного производства,  $W = 12$  %; 3 – пылеунос вращающихся печей известкового производства,  $W = 18$  %; 4 – пылеунос вращающихся печей керамзитового производства,  $W = 17$  %; 5 – измельченные отходы деревообрабатывающего производства с нефтешламовым связующим,  $C_{\text{ншс}} = 40$  %; 6 – древесно-полимерная композиционная смесь; 7 – тонкоизмельченные целлюлозно-бумажные отходы,  $W = 10$  %

идеальную сыпучую среду. Осевые давления, создаваемые прессующими пуансонами, имеющими в сечении сферообразную форму брикета, при двухстороннем прессовании распределяются по поперечному сечению пресс-матрицы равномерно.

Равновесие элементарного слоя при проектировании сил на ось  $X$  можно представить в виде дифференциального уравнения

$$\delta_{\text{ср}} S_{\text{пр.м}} - (\delta_{\text{ср}} + d\delta_{\text{ср}}) S_{\text{пр.м}} - \delta_{\text{ср}} f_0 \xi u dh_{\text{ср}} = 0, \quad (1)$$

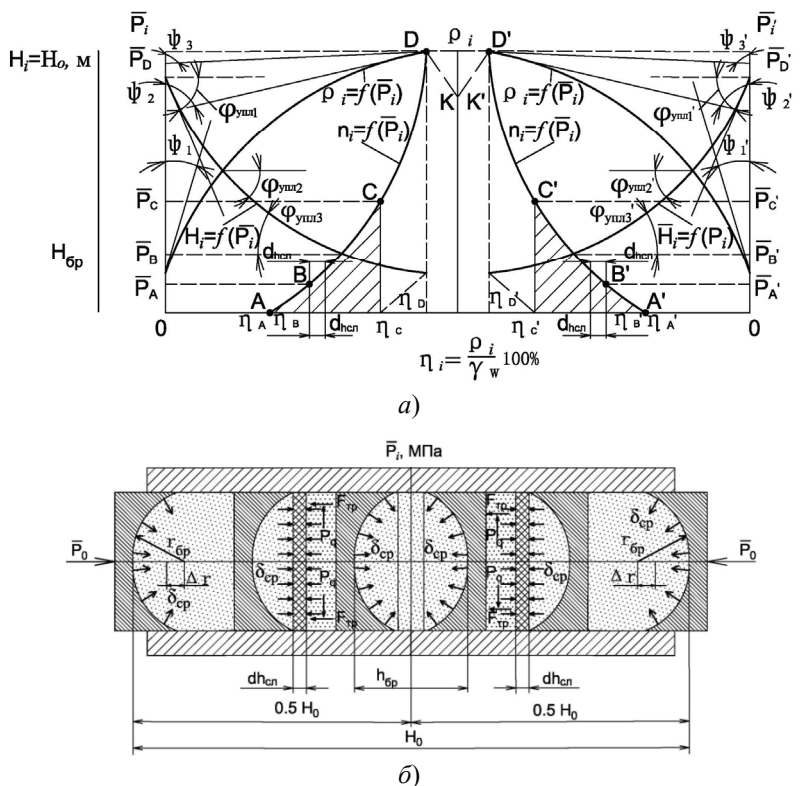
где  $\delta_{\text{ср}}$ ,  $d\delta_{\text{ср}}$  – соответственно напряжения и приращения напряжений, действующие на элементарный слой шихты толщиной  $dh_{\text{ср}}$ ,  $\text{Н/м}^2$ ;  $S_{\text{пр.м}}$ ,  $u$  – соответственно площадь поперечного сечения и периметр пресс-матрицы,  $\text{м}^2$  и  $\text{м}$ ;  $f_0$ ,  $\xi$  – коэффициент внешнего трения и боковое давление шихты соответственно,  $\xi = \bar{P}_q / \varepsilon_{\text{ср}}$ .

При условии, что при прессовании  $f_0 \xi = \text{const}$ , решим уравнение (1) и получим экспоненциальную зависимость

$$\delta_{\text{ср}} = \delta_0 e^{-S_{\text{пр.м}}^{-1} f_0 \xi u h} + c. \quad (2)$$

Постоянную  $c$  находим при условии прекращения движения прессующего пуансона  $h = H_i = 0$  и соблюдении условия  $\delta_{\text{ср}} = \delta_0$  и  $\delta_0 = e^{-c}$ , тогда (2) примет вид

$$\delta_{\text{ср}} = \delta_0 e^{-S_{\text{пр.м}}^{-1} f_0 \xi u h}. \quad (3)$$



**Рис. 2. Процесс уплотнения шихты в пресс-матрице:**

*a* – компрессионные кривые:  $\eta_i = f(\bar{P}_i)$ ,  $\rho_i = f(\bar{P}_i)$ ,  $H_i = f(\bar{P}_i)$ ;

*б* – схема к расчету двухстороннего прессования шихты в пресс-матрице

При перемещении прессующего пуансона на величину  $H_i = x$ , элементарная сила сопротивления

$$dP > \delta_0 f_0 \xi u h, \quad (4)$$

ход пуансона:

$$x = H_0 - h_{\text{бр}} = H_0 \left( \frac{H_0 - h_{\text{бр}}}{H_0} \right) = H_0 \left( 1 - \frac{h_{\text{бр}}}{H_0} \right). \quad (5)$$

Определим

$$\rho_0 = \frac{m_0}{S_{\text{пр.м}} H_0}; \quad \rho_{\text{бр}} = \frac{m_{\text{бр}}}{S_{\text{пр.м}} h_{\text{бр}}}; \quad \eta_0 = \frac{\rho_0}{\gamma_w} \cdot 100\%; \quad \eta_{\text{бр}} = \frac{\rho_{\text{бр}}}{\gamma_w} \cdot 100\%, \quad (6)$$

где  $\rho_0$ ,  $\eta_0$ ,  $m_0$ ,  $\rho_{\text{бр}}$ ,  $\eta_{\text{бр}}$ ,  $m_{\text{бр}}$  – плотность, степень плотности и масса материала в исходном и спрессованном состояниях соответственно.

Для выражения (4)  $\delta_0 = e^{-c}$ ,  $P = P_0$  представим последнее в интегральном виде

$$P_0 = S_0^{H_0 - h_{\text{бр}}} u f_0 \xi dx = \delta_{\text{ср}} f \xi u \int_0^{H_0 - h_{\text{бр}}} e^{\frac{u f_0 \xi}{S_{\text{пр.м}}}} dx. \quad (7)$$

После преобразований получим

$$P_0 = \delta_{\text{ср}} S_{\text{пр.м}} \left[ e^{\left( 1 - \frac{\eta_0}{\eta_{\text{бр}}} \right) H_0 \frac{u f_0 \xi}{S_{\text{пр.м}}}} - 1 \right]. \quad (8)$$

Для установления значения  $\delta_{\text{ср}}$  можно использовать метод эталонов для порошкообразных материалов с одинаковыми физико-механическими характеристиками и условиями прессования (грансоставом, дисперсностью, влажностью, скоростью уплотнения и величиной деформации). Одинаковым значениям плотности шихты соответствуют тождественные значения  $\delta_{\text{ср}}$ .

Для сформованных тел, спрессованных в пресс-матрице и вальцевом прессе среднее нормальное напряжение можно определить по формуле [10]

$$\delta_{\text{ср}} = \frac{(1 + \mu) 2 \bar{P}_{\text{пр max}} - \tau_{\text{сц}} \sin(\varphi_i)}{3(1 + \sin \varphi_i)}, \quad (9)$$

где  $\mu$  – коэффициент поперечной деформации (коэффициент Пуассона);  $\tau_{\text{сц}}$  – параметр, учитывающий сцепление частиц при номинальном давлении прессования, МПа;  $\varphi_i$  – угол внутреннего трения,  $\varphi_i = \text{arctg}(f_i)$ ;  $f_i$  – коэффициент внутреннего трения;  $\bar{P}_{\text{пр max}}$  – предельное давление прессования, МПа.

Тогда выражение (8) с учетом (9) примет вид

$$\bar{P}_0 = \frac{(1 + \mu) 2 \bar{P}_{\text{пр max}} - \tau_{\text{сц}} \sin(\varphi_i)}{3(1 + \sin \varphi_i)} \left[ e^{\left( 1 - \frac{\eta_0}{\eta_{\text{бр}}} \right) H_0 \frac{u f_0 \xi}{S_{\text{пр.м}}}} - 1 \right]. \quad (10)$$

Согласно указанному выше принципу эталонов предельному давлению прессования  $\bar{P}_{\text{пр max}}$  соответствует предельно возможная плотность спрессованного брикета

$$\gamma_w = \frac{100 \gamma_{\text{ТВ}} \gamma_{\text{ж}}}{(100 - w) \gamma_{\text{ж}} + w \gamma_{\text{ТВ}}}, \quad (11)$$

где  $\gamma_{ТВ}$ ,  $\gamma_{Ж}$  – истинная плотность соответственно твердой и жидкой фазы шихты, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – содержание жидкой фазы в смеси, %.

Определение параметров структурно-деформационного взаимодействия частиц при прессовании ( $\mu$ ,  $\tau_{сц}$ ,  $\phi_i$  и др.) возможно при использовании основных принципов статистической механики. Полученное аналитическое выражение (10) подтверждает характер экспериментальных зависимостей, полученных при прессовании техногенных порошкообразных материалов с различными физико-механическими характеристиками.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования процессов уплотнения порошкообразных техногенных материалов позволили выявить общие закономерности их компактирования с рекомендациями по проектированию специального оборудования. Получено уравнение расчета давления прессования дисперсных материалов с учетом структурно-деформационного взаимодействия частиц с различными физико-механическими характеристиками.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ и правительства Белгородской области в рамках научного проекта № 14-41-08054 р\_офи\_м.*

#### *Список литературы*

1. Губанов, Л. И. Рециклирование материалов из отходов и осадков сточных вод при повторном использовании в производстве : учеб. пособие / Л. И. Губанов, А. Ю. Зверева, В. И. Зверева ; Нижегород. гос. архитектур.-строит. ун-т. – Н. Новгород : Изд-во ННГАСУ, 2009. – 405 с.
2. Свергузова, С. В. Промышленная экология как неперемное условие стабильного развития : учеб. пособие / С. В. Свергузова. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2008. – 155 с.
3. Сулименко, Л. М. Агломерационные процессы в производстве строительных материалов / Л. М. Сулименко, Б. С. Альбац. – М. : [б. и.], 1994. – 297 с.
4. Генералов, М. Б. Расчет оборудования для гранулирования минеральных удобрений / М. Б. Генералов, П. В. Классен, А. Р. Степакова. – М. : Машиностроение, 1984. – 192 с.
5. Технические основы переработки и утилизации техногенных материалов : учеб. пособие / В. С. Севостьянов [и др.]. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2011. – 269 с.
6. Ильина, Т. Н. Процессы агломерации в технологиях переработки дисперсных материалов : монография / Т. Н. Ильина. – Белгород : Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. – 229 с.
7. Особенности выбора гранулирующего оборудования многокомпонентных полидисперсных шихт с вторичными материальными ресурсами на основе системного анализа / Д. А. Макаренков [и др.] // Вестн. МГОУ. Сер. Естеств. науки. – 2013. – № 1. – С. 49 – 64.
8. Granules, Tablets and Granulation / Politi, Giovanni, Heilakka, Erkki // Patent Journal. – 2010. – No 3, 31 Mar, Vol 43 (Part 2, 2). – P. 228.
9. Способы компактирования техногенных материалов и технические средства для их реализации / М. В. Севостьянов [и др.] // Вестн. БГТУ им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 107 – 111.
10. Расчет параметров устройств для предварительного уплотнения шихты / М. В. Севостьянов [и др.] // Инновационные материалы, технологии и оборудование для строительства современных транспортных сооружений : сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф., г. Белгород, 8 по 10 октября 2013 г. / Белгород. гос. техн. ун-т им. В. Г. Шухова. – Белгород, 2013. – Т. II. – С. 215 – 221.

## Theoretical and Experimental Studies of the Process of Volume Reduction of Technogenic Powder Materials

M. V. Sevostyanov<sup>1</sup>, T. N. Ilyina<sup>2</sup>, E. N. Semerikova<sup>1</sup>

*Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, Russia;  
msev31@mail.ru*

**Keywords:** compression curves; compression pressure; degree of charge density; press matrix; technogenic materials; volume reduction.

**Abstract:** The rationale for theoretical and experimental studies of the process of pressing of technogenic powder materials for design and process improvement of the existing equipment and creation of special equipment to reduce the volume of charge with different physical and mechanical properties. The authors conducted theoretical studies of the process of volume reduction of technogenic powder materials, obtained the analytical expression for the calculation of the charge compression pressure in view of its physical and mechanical characteristics. General regularities of the process of volume reduction of technogenic powder materials are found, recommendations for the design of special equipment are given.

### References

1. Gubanov L.I., Zvereva A.Yu., Zvereva V.I. *Retsiklirovanie materialov iz otkhodov i osadkov stochnykh vod pri povtornom ispol'zovanii v proizvodstve* [Recycling materials from waste and sewage sludge with repeated use in the manufacture of], Nizhny Novgorod, 2009, 405 p. (In Russ.)
2. Sverguzova S.V. *Promyshlennaya ekologiya kak nepremennoe uslovie stabil'nogo razvitiya* [Industrial ecology as a precondition for sustainable development], Belgorod : Izdatel'stvo BGTU imeni V. G. Shukhova, 2008, 155 p. (In Russ.)
3. Sulimenko L.M., Al'bats B.S. *Aglomeratsionnye protsessy v proizvodstve stroitel'nykh materialov* [Sinter processes in the production of building materials], Moscow, 1994, 297 p. (In Russ.)
4. Generalov M.B., Klassen P.V., Stepakova A.R. *Raschet oborudovaniya dlya granulirovaniya mineral'nykh udobrenii* [Calculation of equipment for granulation of fertilizers], Moscow: Mashinostroenie, 1984, 192 p. (In Russ.)
5. Sevost'yanov V.S., Shinkarev L.I., Sevost'yanov M.V., Makridin A.A., Solopov N.V. *Tekhnicheskie osnovy pererabotki i utilizatsii tekhnogennykh materialov* [Technical bases of processing and utilization of man-made materials], Belgorod: Izdatel'stvo BGTU imeni V.G. Shukhova, 2011, 269 p. (In Russ.)
6. Il'ina T.N. *Protsessy aglomeratsii v tekhnologiyakh pererabotki dispersnykh materialov* [Processes of agglomeration technologies of processing particulate materials], Belgorod: Izdatel'stvo BGTU imeni V.G. Shukhova. 2009, 229 p. (In Russ.)
7. Makarenkov D.A., Nazarov V.I., Gonopol'skii A.M., Trefilova Ya.A. [Choice of the granulating equipment of multicomponent polydisperse mixtures with secondary material resources on the basis of the system analysis], *Vestnik MGOU. Seriya "Estestvennye nauki"* [Bulletin MGOU. Series "Natural sciences"], 2013, no. 1, pp. 49-64. (In Russ., Abstract in Eng.)
8. Politi, Giovanni, Heilakka, Erkki, Granules, tablets and granulation, *Patent Journal*, no. 3, 31 Mar 2010, vol 43 (Part 2, 2), p. 228.
9. Sevost'yanov M.V., Il'ina T.N., Uvarov V.A., Shinkarev L.I. [Methods for compacting technological materials and technical tools to implement them], *Vestnik BGTU imeni V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU. named after V.G. Shukhov], 2015, no. 2, pp. 107-111. (In Russ.)



10. Sevost'yanov M.V., Shinkarev L.I., Spirin M.N., Babukov V.A. [The calculation of device parameters for pre-compaction of the charge], *Innovatsionnye materialy, tekhnologii i oborudovanie dlya stroitel'stva sovremennykh transportnykh sooruzhenii* [Innovative materials, technologies and equipment for the construction of modern transport facilities], Proceedings of the international scientific and practical conference, Belgorod, 8-10 October 2013, vol. II, pp. 215-221. (In Russ.)

---

### **Theoretische und experimentale Forschungen des Prozesses der Kompaktierung der technogenen pulverförmigen Materialien**

**Zusammenfassung:** Es ist die Notwendigkeit der Durchführung der theoretischen und experimentalen Forschungen des Prozesses des Pressens der technogenen pulverförmigen Materialien für die konstruktiv-technologischen Vervollkommnung der existierenden Anlagen und der Bildung der speziellen Anlagen für die Kompaktierung der Beschickungsgüte mit den verschiedenen physikalisch-mechanischen Charakteristiken rechtfertigt. Es sind die theoretischen Forschungen des Prozesses der Kompaktierung der technogenen pulverförmigen Materialien durchgeführt, es ist die analytische Formel für die Berechnung des Drucks des Pressens des Beschickungsgutes unter Berücksichtigung seinen physikalisch-mechanischen Charakteristiken erhalten. Es sind die allgemeinen Gesetzmäßigkeiten des Prozesses der Kompaktierung der technogenen pulverförmigen Materialien bestimmt und es sind die Empfehlungen für die Projektierung der speziellen Anlagen angegeben.

---

### **Etudes théoriques et expérimentales du processus de la compaction des matériaux pulvérulents anthropogènes**

**Résumé:** Est argumentée la nécessité de l'exécution des recherches théoriques et expérimentales du processus du passage des matériaux pulvérulents anthropogènes pour le perfectionnement de l'équipement existant et pour la création de l'équipement spécial pour la compaction des charges avec les différentes caractéristiques physico-mécaniques. Sont effectuées les études théoriques du processus de la compaction des matériaux pulvérulents anthropogènes, est obtenu l'expression analytique pour le calcul de la pression du passage de la charge compte tenu des caractéristiques physico-mécaniques. Sont établies les régularités générales du processus de la compaction des matériaux pulvérulents anthropogènes et sont formulées des recommandations pour la conception de l'équipement spécial.

---

**Авторы:** *Севостьянов Максим Владимирович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы»; *Ильина Татьяна Николаевна* – доктор технических наук, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция»; *Семерикова Евгения Николаевна* – магистрант кафедры «Технологические комплексы, машины и механизмы», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.

**Рецензент:** *Трубаев Павел Алексеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Энергетика теплотехнология», ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова», г. Белгород, Россия.