

АГРОИНЖЕНЕРИЯ

4.3.1 Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса

Научная статья

УДК 67.05: 66.040.287

<https://doi.org/10.28983/asj.y2026i1pp127-137>

**Методика расчета лопастной сушилки  
для установки производства активированного угля**

**Наиль Фарирович Тимербаев, Алексей Сергеевич Родионов, Рушан Гареевич Сафин**

Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия

e-mail: rodionov2014@bk.ru

**Аннотация.** В представленной работе рассматривается разработка методики расчета лопастной сушилки с радиальным движением материала для производства активированного угля из древесных отходов. Актуальность исследования обусловлена необходимостью рациональной утилизации отходов лесопиления, объем которых в РФ составляет около 35 млн м<sup>3</sup> в год. Сушка является обязательным этапом предварительной подготовки сырья, существенно влияющим на эффективность последующих процессов пиролиза и активации. Предложенная методика базируется на материальном и тепловом балансах процесса сушки и позволяет определить ключевые конструктивные параметры сушилки: диаметр и высоту камеры, количество оборотов лопастей, размеры выгрузочных отверстий и другие характеристики. Особое внимание уделяется использованию продуктов пиролиза (горючего газа и обезвоженного дистиллята) в качестве источника энергии для процесса сушки.

**Ключевые слова:** сушка, материальный баланс, пиролиз, топочные газы, обезвоженный дистиллят

Для цитирования: Тимербаев Н. Ф., Родионов А. С., Сафин Р. Г. Методика расчета лопастной сушилки для установки производства активированного угля // Аграрный научный журнал. 2026. № 1. С. 127–137. <https://doi.org/10.28983/asj.y2026i1pp127-137>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

**Calculation methodology for a paddle dryer for an absorbent carbon production**

**Nail F. Timerbaev, Alexey S. Rodionov, Rushan G. Safin**

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia

e-mail: rodionov2014@bk.ru

**Abstract.** The presented work considers the development of a calculation method for a paddle dryer with radial movement of material for the production of absorbent carbon from wood waste. The relevance of the study is due to the need for rational utilization of sawmill waste, the volume of which in the Russian Federation is about 35 million m<sup>3</sup> per year. Drying is an obligatory stage of preliminary preparation of raw materials, significantly affecting the efficiency of subsequent pyrolysis and activation processes. The proposed method is based on the material and heat balances of the drying process and allows determining the key design parameters of the dryer: the diameter and height of the chamber, the number of blade revolutions, the dimensions of the discharge openings and other characteristics. Particular attention is paid to the use of pyrolysis products (combustible gas and dehydrated distillate) as an energy source for the drying process.

**Keywords:** drying, material balance, pyrolysis, flue gases, dehydrated distillate

**For citation:** Timerbaev N. F., Rodionov A. S., Safin R. G. Calculation methodology for a paddle dryer for an absorbent carbon production. *Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal*. 2026;(1): 127–137. (In Russ.). <https://doi.org/10.28983/asj.y2026i1pp127-137>.

**Введение.** Ежегодно образуются миллионы тонн опилок, коры и щепы. Например, в РФ только лесопиление дает порядка 35 млн м<sup>3</sup> отходов в год, большая часть которых не утилизируется рационально [6].

Производство активированного угля из отходов – одно из наиболее перспективных направлений в переработке вторичного сырья. Это связано с экономическими, экологическими и технологическими преимуществами процесса, а также с растущим спросом на адсорбенты в промышленности и экологии [1]



Сушка перед пиролизом – обязательный этап предварительной подготовки сырья, направленный на удаление избыточной влаги. Наличие воды в материале приводит к ряду негативных последствий: повышенный расход энергии – часть тепла тратится на испарение воды, а не на термическое разложение органики; снижение выхода целевых продуктов – из-за конкуренции между пиролизом и испарением влаги уменьшается количество пиролизного газа и угля; ухудшение качества пиролизной жидкости – высокая влажность способствует образованию нестабильных кислородсодержащих соединений, снижающих энергетическую ценность жидкости; коррозия оборудования – водяной пар может вступать в реакции с металлическими частями реактора, сокращая срок его службы.

Эффективность процесса производства активированного угля во многом зависит от качества исходного сырья, в частности от его влажности. Одним из эффективных способов сушки является сушка при конвективном способе подвода тепла [18].

Цель работы – разработка методики расчета лопастной сушилки с радиальным движением материала, и исследование возможности использования продуктов пиролиза для осуществления процесса сушки.

**Материалы и методы.** Непрерывно действующая установка для производства активированного угля (рисунок 1) работает следующим образом. Вторичное сырье измельчается в дисковом измельчителе 1, сушится разбавленными топочными газами, в режиме противотока, в узле конвективной сушки 2, отходящие влажные топочные газы разделяют на два потока, один пневмотранспортирует измельченное сырье, второй нагревает воду для охлаждения горячего активированного угля, после чего частично смешивается с горячими топочными газами, снижая их температуру, и частично выбрасывается в атмосферу после отчистки. В камере пиролиза 3 высушенное сырье кондуктивно пиролизуется в уголь с выделением пиролизных газов. Активация угля проходит в камере активации 4 перегретым водяным паром с выделением горючих газов активации. Активированный уголь охлаждается в две стадии: орошением водой 5 с выделением водяного пара и понижением давления 6. Пиролизные газы из пиролизной камеры 4 и горючие газы активации из камеры активации 5 сепарируются в эжекционном сепараторе 7 на жижку, воду и горючие газы, последние сжигаются в рубашке 8 пиролизной камеры 3.

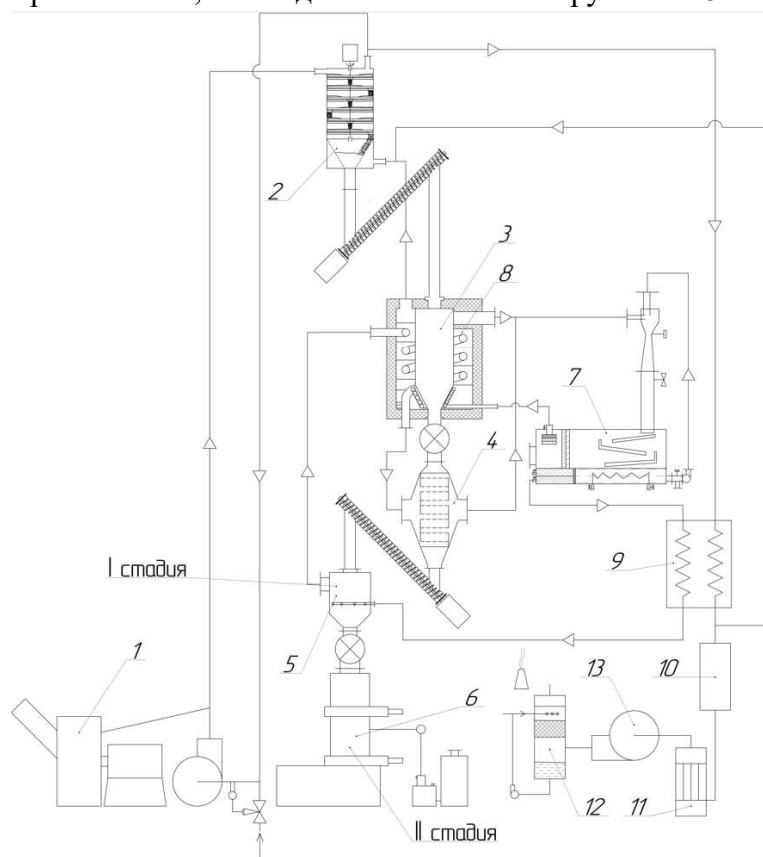


Рисунок 1 – Схема установки для производства активированного угля

Figure 1 – Schematic diagram of the absorbent carbon production



Отсепарированная вода, предварительно нагретая топочными газами в теплообменнике 9, охлаждает активированный уголь на первой стадии охлаждения. Топочными газами перегревают пар с первой стадии охлаждения угля, нагревают пиролизную камеру 3 и конвективно сушат измельченное сырье. Отработанные топочные газы последовательно очищаются в электрическом 10, рукавом 11, абсорбционном 12 фильтрах [11].

Схема лопастной сушилки с радиальным движением материала представлена на рисунке 2, в которой сыпучее сырье, с температурой, влажностью и массовым расходом  $T_{м0}$ ,  $U_{м0}$ ,  $B_{м0}$ , транспортируется по пневмотранспорту 1 влажными топочными газами, с температурой, влажностью и массовым расходом  $T_{гк}$ ,  $\phi_{гк}$ ,  $B_{гк1}$  в камеру сушки 2, где сырье радиально перемещается вращением S-образных лопастей 3, 4 по перфорированным тарелкам 5, 6 с выгрузочными отверстиями в центре и на периферии 5,1; 6,1. S-образные лопасти жестко соединены с валом 7, вращаемым приводом 8. За счет постоянного перемешивания высушиваемое сырье равномерно прогревается и высушивается. Горячие сухие топочные газы с температурой, влажностью и массовым расходом  $T_{г0}$ ,  $\phi_{г0}$ ,  $B_{г}$ , из рубашки пиролизной камеры 8 (см рисунок 1) поступают в камеру сушки через патрубок 9, в дальнейшем двигаясь в режиме противотока. Это обеспечивает минимальную конечную влажность сырья. Перфорированный конус 10 позволяет равномерно распределить топочные газы по сечению сушилки. Высушенный материал с температурой, влажностью

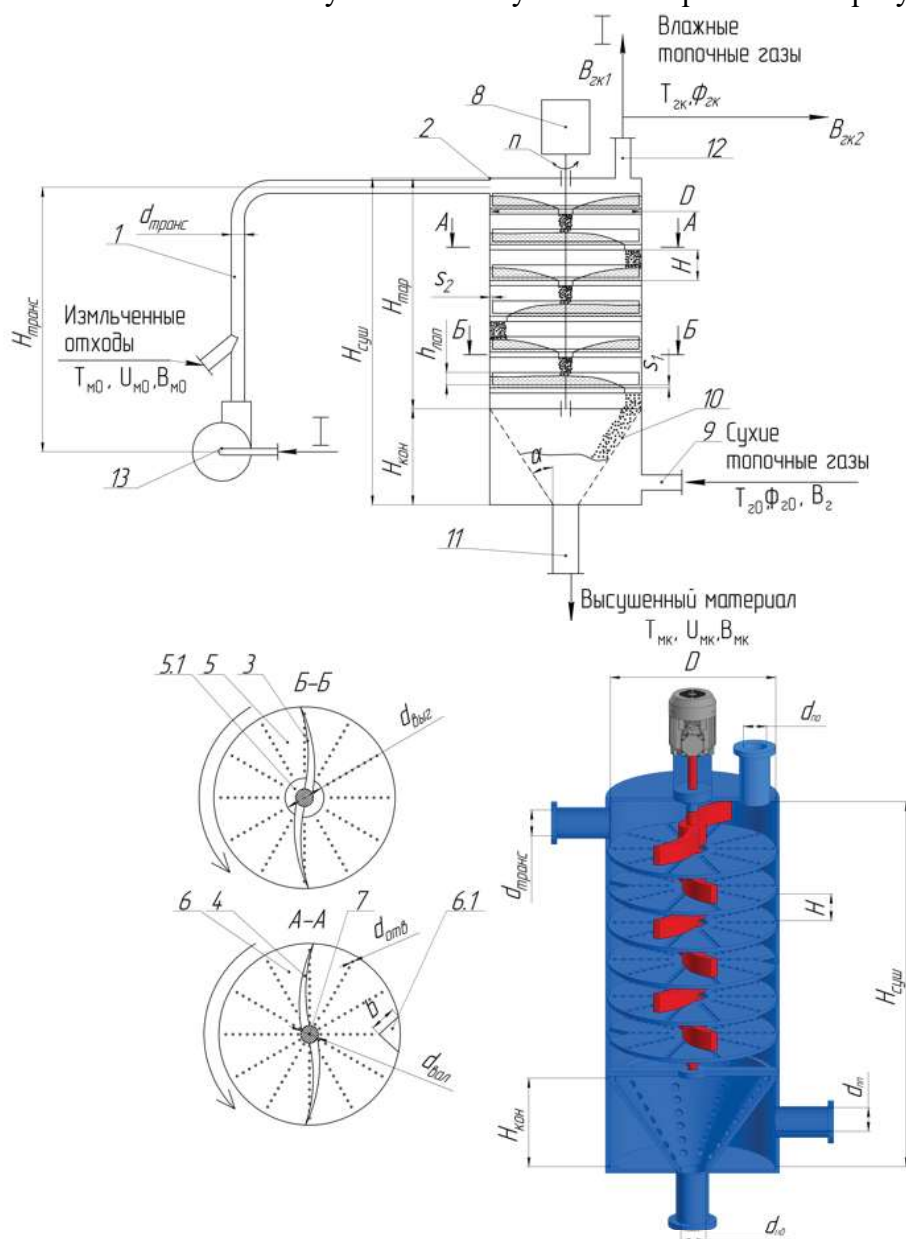


Рисунок 2 – Схема и внешний вид лопастной сушилки с радиальным движением материала

Figure 2 – Diagram and appearance of a paddle dryer with radial movement of material



и массовым расходом  $T_{\text{МК}}, U_{\text{МК}}, B_{\text{МК}}$ , выгружается через патрубок 11. Влажный топочный газ отводят через патрубок 12, после чего разделяется на два потока: один  $B_{\text{ГК1}}$  – нагнетается газодувкой 13 в пневмотранспорт 1, а второй  $B_{\text{ГК2}}$  – направляется в систему отчистки 10, 11, 12 согласно рисунку 1 [8].

Конструктивный расчет сушилки начинается с определения необходимой массовой производительности влажного сырья  $B_{\text{М0}}$  исходя из заданной производительности по сухому сырью  $B_{\text{МК}}$ , кг/ч.

$$B_{\text{М0}} = B_{\text{МК}} (1 + \Delta U), \quad (1)$$

где  $\Delta U$  – величина влагосъема, %, определяется как разность начальной  $U_{\text{М0}}$  и конечной  $U_{\text{МК}}$  влажности материала.

Массовый расход удаляемой влаги рассчитывается из материального баланса

$$B_{\text{ВЛ}} = B_{\text{М0}} - B_{\text{МК}}. \quad (2)$$

Теплота, необходимая для осуществления процесса сушки  $Q_{\text{с}}$  представляет сумму теплоты для прогрева сырья  $Q_{\text{п}}$ , испарения влаги  $Q_{\text{исп}}$  и теплотерь камеры сушки  $Q_{\text{пот}}$  [2].

$$Q_{\text{с}} = Q_{\text{п}} + Q_{\text{исп}} + Q_{\text{пот}}, \quad (3)$$

где

$$Q_{\text{п}} = c_{\text{м}} B_{\text{М0}} (T_{\text{МК}} - T_{\text{М0}}); \quad (4)$$

$$Q_{\text{исп}} = r B_{\text{ВЛ}}; \quad (5)$$

$$Q_{\text{пот}} = 0,03 * (Q_{\text{п}} + Q_{\text{исп}}), \quad (6)$$

где  $c_{\text{м}}$  – средняя теплоемкость материала, кДж/кг·°С;  $r$  – удельная теплота парообразования воды, кДж/кг.

Обработкой литературных данных [14] получена зависимость теплоемкости от температуры и влажности древесины:

$$c_{\text{м}} = 3,5 T_{\text{ср}} + 3200 - 0,0218(130 - 100 U_{\text{ср}})^{2,28}. \quad (7)$$

Массовый расход топочного газа определяется из выражения

$$B_{\text{Г}} = \frac{Q_{\text{с}}}{c_{\text{Г}}(T_{\text{Г0}} - T_{\text{ГК}})}, \quad (8)$$

где  $c_{\text{Г}}$  – теплоемкость топочного газа, кДж/кг·°С.

Из массового расхода топочного газа определяется объемный расход:

$$V_{\text{Г}} = \frac{B_{\text{Г}}}{\rho_{\text{Г}}}, \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{Г}}$  – плотность топочного газа, кг/м<sup>3</sup>.

В таблице представлены термодинамические параметры топочного газа, полученного в результате сжигания пиролизного газа и обезвоженного дистиллята [9, 19].

**Термодинамические показатели топочного газа, полученного при сжигании горючего пиролизного газа и обезвоженного пиролизного дистиллята**

**Thermodynamic properties of flue gas obtained by burning combustible pyrolysis gas and dehydrated pyrolysis distillate**

| Вещество         | $C_{\text{ГГ}}, \% \text{масс}$ | $C_{\text{ПД}}, \% \text{масс}$ | $c_{\text{Г}}, \text{кДж/кг} \cdot \text{°С}$ | $\rho_{\text{Г}}, \text{кг/м}^3$ | $M_{\text{Г}}, \text{кг/моль}$ |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|----------------------------------|--------------------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 0,33                            | 0,1610                          | 0,978   | 1,192                            | 0,044                          |
| H <sub>2</sub> O | 0,0375                          | 0,0524                          | 2,57  | 0,487                            | 0,018                          |
| O <sub>2</sub>   | 0,0571                          | 0,0711                          | 0,956   | 0,866                            | 0,032                          |
| N <sub>2</sub>   | 0,574                           | 0,7155                          | 1,049   | 0,758                            | 0,028                          |



Теплоемкость и плотность топочного газа рассчитываются по соотношениям:

$$c_{\Gamma} = \sum_{i=1}^n C_i c_i = C_{\text{CO}_2} c_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} c_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{O}_2} c_{\text{O}_2} + C_{\text{N}_2} c_{\text{N}_2}; \quad (10)$$

$$\rho_{\Gamma\Gamma} = \sum_{i=1}^n C_i \rho_i = C_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} + C_{\text{H}_2\text{O}} \rho_{\text{H}_2\text{O}} + C_{\text{O}_2} \rho_{\text{O}_2} + C_{\text{N}_2} \rho_{\text{N}_2}, \quad (11)$$

где  $C_i$  – массовая доля  $i$ -го компонента, %;  $\rho_i$  – плотность  $i$ -го компонента, кг/м<sup>3</sup>;  $c_i$  – массовая теплоемкость  $i$ -го компонента, кДж/кг·°С [4].

По данным таблицы можно рассчитать влагосодержание топочного газа на входе [17]:

$$X_{\Gamma 0} = \frac{C_{\text{H}_2\text{O}}}{C_{\text{CO}_2} + C_{\text{O}_2} + C_{\text{N}_2}}, \quad (12)$$

Относительная влажность топочного газа, определяющая конечную влажность сырья  $U_{\text{МК}}$  рассчитывается по формуле [16]:

$$\varphi_{\Gamma 0} = \frac{p_{w0}}{p_{\text{нас}0}} \quad (13)$$

где  $p_{w0}$  – парциальное давление пара, Па;  $p_{\text{нас}0}$  – давление насыщения, Па.

Парциальное давление пара в топочном газе рассчитывается из соотношения [15]:

$$p_{w0} = \frac{X_{\Gamma 0} P}{\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{сух}}} + X_{\Gamma 0}}, \quad (14)$$

где  $P$  – общее давление топочного газа, Па;  $M_{\text{воды}}$  – молярная масса воды, г/моль;  $M_{\text{сух}}$  – молярная масса сухого топочного газа, г/моль.

Молярная масса сухих топочных газов зависит от молярных масс компонентов газа и их массовой концентрации:

$$M_{\text{сух}} = \frac{1}{\sum \frac{m_i}{M_i}} = \frac{1}{\frac{C_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{C_{\text{O}_2}}{M_{\text{O}_2}} + \frac{C_{\text{N}_2}}{M_{\text{N}_2}}}. \quad (15)$$

Давление насыщения определяется из уравнения Антуана:

$$p_{\text{нас}0} = 10^{\left( A - \frac{B}{C + T_{\Gamma 0}} \right)}. \quad (16)$$

Обработкой литературных данных получена зависимость равновесного влагосодержания древесины от относительной влажности  $\varphi_{\Gamma 0}$  и температуры топочного газа  $T_{\Gamma 0}$  [14]:

$$U_{\text{МК}} = 5,187 + 20,498\varphi_{\Gamma 0} - 33,887\varphi_{\Gamma 0}^2 + 66,888\varphi_{\Gamma 0}^3 - 81,464\varphi_{\Gamma 0}^4 + 52,025\varphi_{\Gamma 0}^5 - 0,248T_{\Gamma 0} + 0,00963T_{\Gamma 0}^2 - 1,806 \cdot 10^{-4}T_{\Gamma 0}^3 + 1,39 \cdot 10^{-6}T_{\Gamma 0}^4 - 3,683 \cdot 10^{-9}T_{\Gamma 0}^5. \quad (17)$$

Влагосодержание топочного газа и парциальное давление водяного пара на выходе сушилки составит:

$$X_{\Gamma\text{К}} = \frac{m_{\Gamma} C_{\text{H}_2\text{O}} + W}{m_{\Gamma} (C_{\text{CO}_2} + C_{\text{O}_2} + C_{\text{N}_2})}; \quad (18)$$

$$p_{w\text{К}} = \frac{X_{\Gamma\text{К}} P}{\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{M_{\text{сух}}} + X_{\Gamma\text{К}}}. \quad (19)$$

При относительной влажности топочного газа больше 100 % наблюдается конденсация водяного пара, поэтому  $p_{w\text{К}} < p_{\text{нас.к}}$  из этого соотношения по уравнению Антуана можно выделить температуру мокрого термометра:

$$V_{\text{тап}} = \frac{B_{\text{МО}} t}{n_{\text{тап}} \rho_{\text{нас}}}, \quad (20)$$



Объем материала, находящегося на одной тарелке, зависит от числа тарелок и продолжительности процесса сушки:

$$V_{\text{тар}} = \frac{B_{\text{м0}}t}{n_{\text{тар}}\rho_{\text{нас}}}, \quad (21)$$

где  $n_{\text{тар}}$  – количество тарелок принимаемое равной 5;  $\rho_{\text{нас}}$  – насыпная плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;  $t$  – время сушки, ч; определяемое физическим и математическим моделированием [8].

При высоте слоя  $h$  диаметр сушильной камеры рассчитывается следующим образом:

$$D = \sqrt{\frac{4V_{\text{тар}}}{\pi h}}. \quad (22)$$

Скорость топочного газа не должна превышать скорость витания частиц [7]:

$$w_s = 0,14 \sqrt{\frac{\rho_m}{(0,02 + \frac{a}{c})\rho_{\text{тг}}}} \quad (23)$$

где  $\rho_m$  – плотность материала транспортируемых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{тг}}$  – плотность топочного газа, кг/м<sup>3</sup>;  $a$  – коэффициент формы тела;  $c$  – толщина частицы, м.

Высота ворошимого слоя сыпучего материала определяется исходя из гидравлического сопротивления слоя сыпучего материала и перфорированных решеток. Большое сопротивление может нарушить отток топочного газа из рубашки пиролизной камеры 8 (см рис. 1) [5].

$$h = \frac{\Delta P - \zeta \frac{\rho_{\text{тг}} 0,5 w_s^2 n_{\text{тар}}}{2}}{K n_{\text{тар}} \left( \frac{150 \mu 0,5 w_s (1 - \varepsilon)^2}{F^2 d_3^2 \varepsilon^2} + \frac{1,75 \rho_{\text{тг}} 0,5 w_s^2 (1 - \varepsilon)}{F d_3 \varepsilon^3} \right)} \quad (24)$$

где  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление, Па; для фильтрации газа через слой материала принимается равным 500–2000 Па;  $K$  – поправочный коэффициент, учитывающий ворошение материала;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с;  $\varepsilon$  – пористость материала;  $F$  – коэффициент фактора формы;  $d_3$  – эквивалентный диаметр, м; рассчитываемый по формуле

$$d_3 = \sqrt[3]{\frac{6V_q}{\pi}} \quad (25)$$

где  $V_q$  – объем частицы; м<sup>3</sup>.

Коэффициент фактора формы это отношение площади поверхности эквивалентного шара к площади поверхности частицы [10]:

$$F = \frac{\pi d_3^2}{2(ab + ac + bc)} \quad (26)$$

где  $a, b, c$  – размеры частицы, м.

Площадь перфорации диска составит [13]:

$$S_{\text{перф}} = \frac{V_{\text{г}}}{0,5 w_s 3600}. \quad (27)$$

Количество отверстий перфорации:

$$y = \frac{\pi D^2 j}{4}, \quad (28)$$

где  $j$  – количество отверстий на единицу площади.

Тогда диаметр отверстий составит:



$$d_{\text{отв}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{перф}}}{\pi u}} \quad (29)$$

Площадь выгрузочного отверстия тарелок определяется соотношением

$$S_{\text{отв}} = \frac{B_{\text{МК}}}{\rho_{\text{нас}} w 3600} \quad (30)$$

где  $w$  – скорость падения частиц, м/с.

Диаметр выгрузочного отверстия нечетной тарелки рассчитывается по соотношению

$$d_{\text{выг}} = \sqrt{\frac{4S_{\text{отв}}}{\pi} + d_{\text{вал}}^2} \quad (31)$$

где  $d_{\text{вал}}$  – диаметр вала, м.

Отверстие в четной тарелке представляет собой сектор окружности радиусом  $b$  с центральным углом  $60^\circ$ , тогда:

$$b = \sqrt{\frac{6S_{\text{отв}}}{\pi}} \quad (32)$$

Расчет количества оборотов лопастей для обеспечения необходимой производительности [12]:

$$n = \frac{B_{\text{МО}}}{60kV_{\text{захвата}}z\rho_{\text{нас}}} \quad (33)$$

где  $k$  – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности сушилки и свойства материала,  $k = 0,6-0,8$ ;  $V_{\text{захвата}}$  – объем захвата материала одной лопастью,  $\frac{\text{м}^3}{\text{об}}$ ,  $z$  – количество лопаток.

$$V_{\text{захвата}} = \frac{\pi(D-d_{\text{выг}})^2}{4} h \quad (34)$$

Диаметр патрубка выгрузки сушилки рассчитывается по формуле

$$d_{\text{пв}} = \sqrt{\frac{4B_{\text{МО}}}{3600\pi w \rho_{\text{нас}}}} \quad (35)$$

Для исключения сводообразования диаметр патрубка выгрузки необходимо проверить по формуле Алфорова [3]:

$$d_{\text{пв}}^* = k'(x + 80)\text{tg}(\varphi), \quad (36)$$

где  $k'$  – опытный коэффициент,  $k' = 2,4-2,6$ ;  $x$  – наибольший размер частицы, м;  $\varphi$  – угол внутреннего трения, характеризующий сопротивление слоя частиц сдвигу под действием внешних сил. Для высушенной щепы его значение находится в пределе  $35-45^\circ$ .

Высота перфорированного конуса:

$$H_{\text{кон}} = \frac{D-d_{\text{отв}}}{2\text{tg}(\alpha^0)} \quad (37)$$

Высота сушилки:

$$H_{\text{суш}} = H_{\text{тар}} + H_{\text{кон}}, \quad (38)$$

где  $H_{\text{тар}}$  – высота тарельчатой зоны:

$$H_{\text{тар}} = 2hn_{\text{тар}} \quad (39)$$

Расход транспортировочного газа  $m_{\text{гк1}}$  рассчитывается исходя из концентрации воздушной смеси [7]:



$$m_{\text{ГК1}} = \frac{B_{\text{М0}}}{\mu}, \quad (40)$$

где  $\mu$  – концентрация воздушной смеси. Маленькие значения увеличивают диаметр трубопровода, а большие увеличивают энергозатраты пневмотранспортирования, значение  $\mu$  должно составлять 1,0–1,5.

Оптимальная скорость топочного газа при пневмотранспортировании рассчитывается из соотношения [7]:

$$W_{\text{опт}} = Kw_s, \quad (41)$$

где  $K$  – коэффициент запаса 1,5–2.

Диаметр трубопровода пневмотранспорта будет равен [12]:

$$d_{\text{транс}} = 1,88 \cdot 10^{-2} \sqrt{\frac{m_{\text{ГК1}}}{3600\rho_{\text{ГГ}}W_{\text{опт}}}}. \quad (42)$$

Диаметр патрубка подачи топочного газа рассчитывается по формуле

$$d_{\text{пат}} = \sqrt{\frac{4V_{\text{Г}}}{3600\pi w_{\text{Г}}}}, \quad (43)$$

где  $w_{\text{Г}}$  – скорость топочного газа в трубопроводе, м/с,  $w_{\text{Г}} = 6–8$  м/с. Диаметр патрубка отвода  $d_{\text{по}}$  принимаем равным диаметру патрубка подачи топочного газа.

Высоту лопатки  $h_{\text{лоп}}$  принимаем равной  $1,5h$ , такое соотношение позволит эффективно перемещать материал по тарелкам. Величину зазоров  $s_1$  и  $s_2$  принимаем равными наименьшему размеру высушиваемых частиц.

**Результаты исследований.** По разработанной методике производили расчет лопастной сушилки с радиальным движением материала при сушке осинового щепы размером  $20 \times 20 \times 30$  мм, насыпной плотностью  $\rho_{\text{нас}} = 135$  кг/м<sup>3</sup>, плотностью материала  $\rho_{\text{м}} = 420$  кг/м<sup>3</sup>, пористостью  $\varepsilon = 0,74$ , при производительности по сухому сырью  $B_{\text{МК}} = 100$  кг/ч, топочными газами, разбавленными до температуры  $350$  °С, полученными при сжигании горючего пиролизного газа и обезвоженного пиролизного дистиллята. По литературным данным: при пиролизе осины, при температуре  $500$  °С и скорости нагрева  $3$  °С/мин, выход газа и обезвоженного дистиллята соответственно составляет  $24,2$  и  $6,9$  %; при количестве тарелок  $n_{\text{тар}} = 5$  и скорости вращения лопастей  $11$  мин<sup>-1</sup> гидравлическое сопротивление сушилки составляет  $2000$  Па.

На рисунке 3 представлена зависимость температуры мокрого термометра топочного газа на выходе из сушилки от количества удаляемой влаги из сыпучего материала.

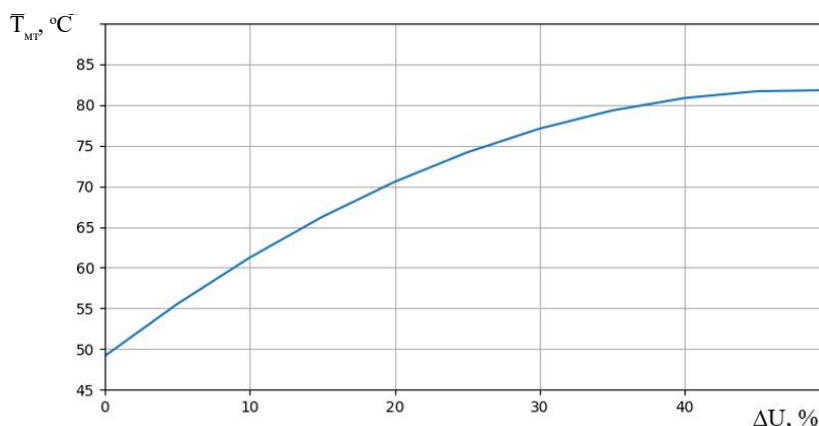


Рисунок 3 – Зависимость температуры мокрого термометра от величины влагосъема

Figure 3 – Dependence of wet-bulb temperature on the moisture removal value

Данная зависимость позволяет рекомендовать температуру топочного газа на выходе  $T_{\text{ГК}}$  при максимальной относительной влажности  $\varphi_{\text{ГК}}$ . Температура топочного газа  $T_{\text{ГК}}$  должна быть выше,



чем температура мокрого термометра, в противном случае, будет наблюдаться конденсация паров воды, на поверхности высушиваемого материала.

На рисунке 4 показана зависимость удельной теплоты для достижения необходимого значения влагосъема.

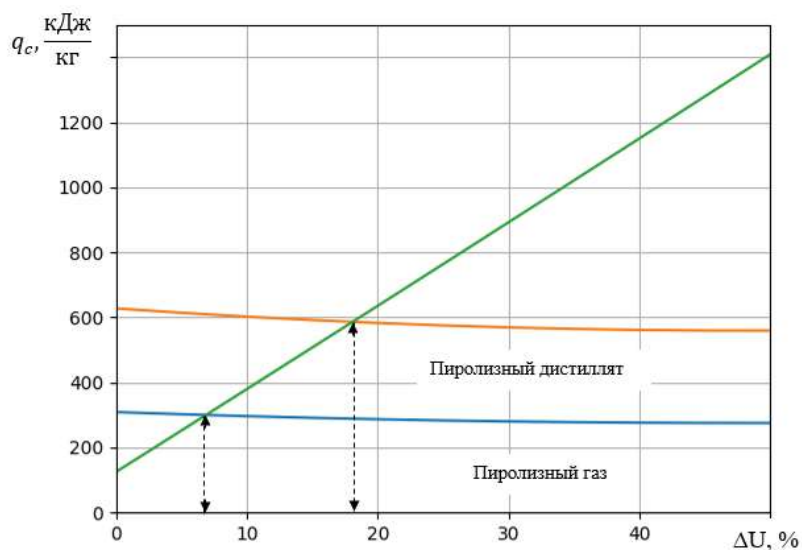


Рисунок 4 – Зависимость удельной теплоты от величины влагосъема

Figure 4 – Dependence of specific heat on the amount of moisture removal

Приведенная зависимость показывает, что требуемая удельная теплота для проведения процесса сушки прямо пропорциональна величине влагосъема и возрастает линейно. При использовании энергии сжигания пиролизных газов максимальная величина влагосъема составляет 6,8 %, добавка обезвоженного дистиллята к горючему пиролизному газу позволит увеличить влагосъем до 18 %.

На рисунке 5 показаны зависимости диаметра и высоты сушилки от величины влагосъема и производительности при начальной влажности сырья 23 %.

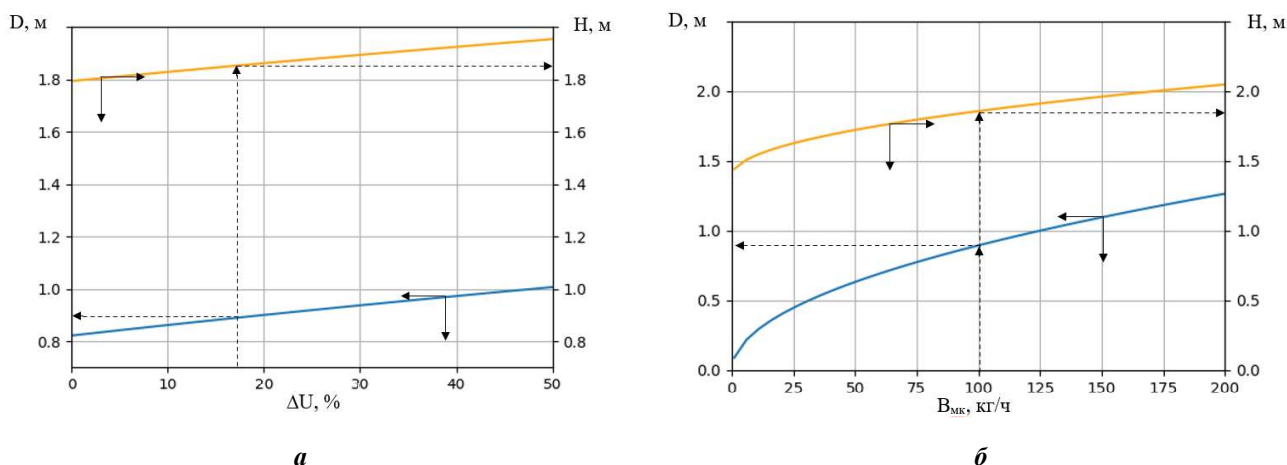


Рисунок 5 – Зависимость диаметра и высоты сушильной камеры:  
а – от влагосъема; б – от производительности

Figure 5 – Dependence of the diameter and height of the drying chamber:  
a – on moisture removal; b – on productivity

Анализ зависимостей показывает, что при увеличении влагосъема диаметр и высота сушилки изменяются линейно. Это связано с увеличением количества материала, одновременно находящегося в сушилке. Данные зависимости учитывают: время нахождения материала в сушилке, производительность по сухому сырью и гидравлическое сопротивление слоя материала в сушилке. При величине влагосъема 18 % диаметр и высота лопастной сушилки соответственно





0,9 и 1,82 м. При увеличении производительности форма сушилки приближается к равностороннему цилиндру, это связано с тем, что высота слоя материала фиксированная, так как ее увеличение ведет к росту гидравлического сопротивления по (см. формулу (24)). Высота сушилки в данном случае зависит исключительно от высоты конусной части, которая в свою очередь зависит от диаметра. На основании изложенного можно сделать вывод что производительность лопастной сушилки в данном случае зависит от диаметра. Большую производительность при наименьшем диаметре можно получить путем увеличения числа тарелок с соответствующим увеличением напора газодувки 13 (см. рисунок 1), обеспечивающей движение топочного газа через слой высушиваемого материала. При производительности по сухому сырью  $V_{\text{МК}} = 100$  кг/ч, диаметр и высота лопастной сушилки соответственно составят 0,9 и 1,82 м.

**Заключение.** На основе материального и теплового баланса разработана методика расчета, позволяющая определить ключевые конструктивные параметры и гидродинамические характеристики лопастной сушилки для установки производства активированного угля, в которой сушка исходного сырья происходит топочными газами, полученными в результате сжигания пиролизных газов и обезвоженного пиролизного дистиллята.

В результате расчета было установлено, что при использовании энергии сжигания горючих газов максимальная величина влагосъема составляет 6,25 %, при смешивании горючего газа с обезвоженным пиролизным дистиллятом этот показатель можно увеличить до 18 %.

При увеличении производительности установки форма сушилки приближается к правильному цилиндру, в котором диаметр равняется высоте.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Беляев Е. Ю. Получение и применение древесных активированных углей в экологических целях // Химия растительного сырья. 2000. № 2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primeneniye-drevesnyh-aktivirovannyh-ugley-v-ekologicheskikh-tselyah> (дата обращения: 28.03.2025).
2. Верете А. Г., Дельвинг А. К. Судовые паровые и газовые энергетические установки: учебник для мореходных училищ. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1990. 240 с.
3. Воробьев А. А., Мигров А. А. Анализ и выбор геометрических параметров бункера для изучения процесса выгрузки сыпучих материалов // Известия Петербургского университета путей сообщения. 2022. № 1.
4. Гришин Ю. М. О расчете теплоемкостей химически реагирующих газов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2006. № 3. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-raschete-teploemkostey-himicheskii-reagiruyuschih-gazov> (дата обращения: 28.03.2025).
5. Исмагилова А. Р., Туманова Е. Ю. Моделирование пневмотранспорта сыпучих материалов // Современные техно-логии в нефтегазовом деле – 2019: сб. трудов Междунар. науч.-техн. конф. в 2 т., Уфа, 29 марта 2019 года. Т. 2. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет, 2019. С. 141–143.
6. Колесникова А. В. Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. 2013. №33. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-othodov-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii> (дата обращения: 28.03.2025).
7. Кузнецов В. С. Денисов С. В. Пневматический транспорт на деревообрабатывающих предприятиях. Внешние пневмотранспортные установки: учеб. пособие. Братск: БрГУ, 2007. 67 с.
8. Моделирование процесса сушки вторичного сырья в технологической линии производства активированного угля / Р. Г. Сафин [и др.] // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2023. Т. 27. № 4. С. 117–127. DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127. EDN PFDHFG.
9. Особенности пиролиза древесины лиственницы и свойства получаемых углей / Н. В. Чесноков [и др.] // Хвойные бореальной зоны. 2003. Т. 21. № 1. С. 91–96. EDN JVDUYR.
10. Отчистка газов: Справочное издание. М.: Теплоэнергетик, 2002. 640 с.
11. Патент № 2789699 С1 Российская Федерация, МПК C01B 32/324, C10B 53/00. Способ получения активированного угля: № 2021135547 : заявл. 03.12.2021; опубл. 07.02.2023 / Р. Г. Сафин, В. Г. Сотников, А. С. Родионов [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет». EDN ACLSDB.
12. Расчет основных параметров машин для объемного дозирования сыпучих продуктов: методические указания / И.А. Гайсин [и др.]. Набережные Челны, 2018. 26 с.
13. Рекач Ф. В., Синиченко Е. К. Определение оптимальной площади отверстий перфорации в колпаке при гидроударе в напорных водоводах // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2010. №2. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnoy-ploschadi-otverstiy-perforatsii-v-kolpake-pri-gidroudare-v-napornyh-vodovodah> (дата обращения: 30.04.2025).
14. Соколов И. В. Свойства древесины как материала, подвергаемого сушке и термомодификации: тепловые свойства: теплоемкость древесины // Вестник науки. 2024. № 5 (74). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-drevesiny-kak-materiala-podvergaemogo-sushke-i-termomodifikatsii-teplovye-svoystva-teploemkost-drevesiny> (дата обращения: 28.03.2025).

15. Тепломассообменное оборудование предприятий (Сушильные установки): учеб. пособие. СПб., 2016. 142 с.: ил. 68.
16. Теплотехника: учеб. пособие. Ставрополь, 2020. 128 с. .
17. Тиллоева Ш. Ф. Влагосодержание газов и осушка их цеолитами // Аллея науки. 2022. Т. 1. № 12(75). С. 616–620. EDN JAUEMF.
18. Тимербаев Н. Ф., Сафин Р. Г., Зиятдинова Д. Ф. Конвективная сушка дисперсных материалов перед термохимическим процессом переработки // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2019. № 5. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/konvektivnaya-sushka-dispersnyh-materialov-pered-termohimicheskim-protssom-pererabotki> (дата обращения: 28.03.2025).
19. Safin R. G., Rodionov A. S., Ziatdinova D. F. Modeling of the Process of Thermochemical Decomposition of Plant Waste in the Activated Carbon Production Line // *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024. Vol. 58. No. 3. P. 811–817. DOI 10.1134/S0040579524601602. EDN RKCSWH.

## REFERENCES

1. Belyaev E. Yu. Production and application of wood activated carbons for environmental purposes. *Chemistry of Plant Raw Materials*. 2000;(2). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/poluchenie-i-primenenie-drevesnyh-aktivirovannyh-uglye-v-ekologicheskikh-tselyah> (accessed: 28.03.2025). (In Russ.).
2. Verete A. G., Delving A. K. Ship steam and gas power plants: Textbook for Maritime Schools. - 2nd ed., revised and enlarged. Moscow, 1990. 240 p. (In Russ.).
3. Vorobyov A. A., Migrov A. A. Analysis and selection of geometric parameters of a hopper for studying the process of unloading bulk materials. *Bulletin of the St. Petersburg State Transport University*. 2022;(1). (In Russ.).
4. Grishin Yu. M. On the calculation of the heat capacity of chemically reacting gases // *Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences*. 2006;(3). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-raschete-teploemkostey-himicheski-reagiruyuschih-gazov> (date of access: 03/28/2025). (In Russ.).
5. Ismagilova A. R., Tumanova E. Yu. Modeling of pneumatic transport of bulk materials. *Modern Technologies in the Oil and Gas Business – 2019: collection of papers of the international scientific and technical conference: in 2 volumes*, Ufa, March 29, 2019. Vol. 2. Ufa: Ufa State Petroleum Technological University, 2019:141–143. (In Russ.).
6. Kolesnikova A. V. Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of the forest industry complex of Russia. *Current Issues of Economic Sciences*. 2013;(33). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-obrazovaniya-i-ispolzovaniya-drevesnyh-othodov-na-predpriyatiyah-lesopromyshlennogo-kompleksa-rossii> (date of access: 28.03.2025). (In Russ.).
7. Kuznetsov V.S. Denisov S.V. Pneumatic transport at woodworking enterprises. External pneumatic transport units: textbook. Bratsk, 2007. 67 p. (In Russ.).
8. Modeling of the process of drying secondary raw materials in the technological line of activated carbon production / R.G. Safin et al. *Forestry Bulletin*. 2023;27(4):117–127. DOI 10.18698/2542-1468-2023-4-117-127. EDN PFDHFG. (In Russ.).
9. Features of larch wood pyrolysis and properties of the resulting coals / N. V. Chesnokov. *Conifers of the Boreal Zone*. 2003;21(1):91–96. EDN JVDUYR. (In Russ.).
10. Gas purification: Reference publication. Moscow, 2002. 640 p. (In Russ.).
11. Patent No. 2789699 C1 Russian Federation, IPC C01B 32/324, C10B 53/00. Method for producing activated carbon: No. 2021135547: declared 03.12.2021: published 07.02.2023 / R. G. Safin, V. G. Sotnikov, A. S. Rodionov [et al.]; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “Kazan National Research Technological University”. EDN ACLSDB. (In Russ.).
12. Calculation of the main parameters of machines for volumetric dosing of bulk products: guidelines / I. A. Gaisin et al. Naberezhnye Chelny, 2018. 26 p. (In Russ.).
13. Rekach F. V., Sinichenko E. K. Determination of the optimal area of perforation holes in the cap during water hammer in pressure water pipelines. *Bulletin of RUDN. Series: Engineering Research*. 2010;(2) Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-optimalnoy-ploschadi-otverstiy-perforatsii-v-kolpake-pri-gidroudare-v-napornyh-vodovodah> (date of access: 30.04.2025). (In Russ.).
14. Sokolov I. V. Properties of wood as a material subjected to drying and thermal modification: thermal properties: heat capacity of wood. *Bulletin of Science*. 2024;5(74). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/svoystva-drevesiny-kak-materiala-podvergaemogo-sushke-i-termomodifikatsii-teplovye-svoystva-teploemkost-drevesiny> (Accessed: March 28, 2025). (In Russ.).
15. Heat and mass transfer equipment of enterprises (drying units). St. Petersburg, 2016. 142 p. (In Russ.).
16. Heat engineering. Stavropol, 2020. 128 p.: ill. (Textbooks for universities. Specialized literature). (In Russ.).
17. Tilloeva Sh. F. Moisture content of gases and their drying with zeolites. *Alley of Science*. 2022;1;12(75):616–620. EDN JAUEMF. (In Russ.).
18. Timerbaev N. F., Safin R. G., Ziatdinova D. F. Convective drying of dispersed materials before thermochemical processing. *News of Universities. Problems of Energy*. 2019;(5). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/konvektivnaya-sushka-dispersnyh-materialov-pered-termohimicheskim-protssom-pererabotki> (accessed: 03/28/2025). (In Russ.).
19. Safin R. G., Rodionov A. S., Ziatdinova D. F. Modeling of the Process of Thermochemical Decomposition of Plant Waste in the Activated Carbon Production Line. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2024;58(3):811–817. DOI 10.1134/S0040579524601602. EDN RKCSWH. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 27.02.2025; одобрена после рецензирования 18.04.2025; принята к публикации 10.05.2025.  
The article was submitted 27.02.2025; approved after reviewing 18.04.2025; accepted for publication 10.05.2025.

