

## РАЗРАБОТКА ИМПОРТОЗАМЕЩАЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Докт. техн. наук, проф. БЕРЕЗОВСКИЙ Н. И.,  
канд. техн. наук, доц. ВОРОНОВА Н. П., асп. ГРИБКОВА С. М., ЛЕСУН Б. В.*

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: boris.lesun@bntu.by

Представлены результаты исследований по проблеме рационального использования минеральных ресурсов, в частности показана возможность расширения интервала пригодности сырья и его использования для получения строительных продуктов в зависимости от химического и минералогического состава отходов. Анализ проведенных исследований показывает, что в технологии производства пористых строительных материалов возможно импортозамещение антрацита, бурого и каменного угля на местные виды топлива – фрезерный торф и его некондиционный продукт.

Разработана математическая модель процесса сушки и на основе ее решения предложена технология тепловой работы агломерационной машины с расчетом ее длины при заданных скоростях движения палет. Прямоточное движение дымовых газов и нагреваемых материалов является основной особенностью применяемых в производстве ленточных агломерационных машин. При этом весь процесс сушки можно разделить на два периода: постоянной и падающей скорости сушки. Результаты вычислений показали, что скорость сушки зависит от влагосодержания, но не зависит от теплообменного критерия Био. Однако скорость нагревания является функцией и температуры, и  $Bi_q$ . Механизм переноса влаги при различных методах сушки один и тот же в среде как с постоянной, так и с переменной температурами. Применение данной математической модели дает возможность значительной экономии энергоресурсов, затрачиваемых на сушку.

Приведены методики расчета технологически важных оптимальных параметров процессов агломерации с применением фрезерного торфа.

**Ключевые слова:** импортозамещающие технологии, строительные материалы, аглопорит.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

## DEVELOPMENT OF IMPORT-SUBSTITUTING TECHNOLOGIES FOR BUILDING MATERIAL PRODUCTION

*BEREZOVSKY N. I., VORONOVA N. P., GRIBKOVA S. M., LESUN B. V.*

*Belarusian National Technical University*

The paper presents results of investigations on rational usage of mineral resources. In particular, it has shown the possibility to increase a period of raw material serviceability and its application for production of building products depending on chemical and mineralogical composition of the waste. Analysis of the executed investigations shows that import substitution of anthracite, lignite and black coal for local fuels (milled peat and its sub-standard product) is possible in the production technology of porous building materials.

A mathematical model for drying process has been developed in the paper. Technology for thermal performance of a sintering machine with calculation of its length at the given pallet speed has been proposed on the basis of the developed model. Once-through circulation of flue gases and heated materials is the main specific feature of belt sintering machines being used in production. In such a case the whole drying process can be divided into two periods: a period of constant drying rate and a period of falling drying rate. Calculations have shown that the drying rate depends on moisture content but it does not depend on heat exchange Bio-criteria, however, heating rate is a function of temperature and  $Bi_q$ . A mechanism of moisture transfer using various drying methods is the same as in an environment with constant temperature and so in an environment with variable temperature. Application of the mathematical model provides the possibility to save significantly power resources expended for drying process.

The paper gives description of methodology for calculation of technologically important optimum parameters for sintering processes of agglomeration while using milled peat.

**Keywords:** import-substituting technologies, building materials, agloporite.

Fig. 1. Tab. 1. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Особенно остро в настоящее время стоит проблема импортозамещения. Постановка и решение задач комплексного использования местного сырья актуальны при разработке и внедрении ресурсо- и энергосберегающих технологий добычи и переработки сырья гравийно-песчаных месторождений.

**Технология получения аглопорита.** Анализ теплотехнических характеристик торфа позволяет допустить его использование как технологического топлива при производстве аглопорита. Например, теплота сгорания горючей массы торфа – от 3500 до 3700 ккал/кг, т. е. пределы сравнительно незначительные. Теплота сгорания рабочей массы торфа колеблется в широких пределах в зависимости от влажности массы и ее зольности.

Оптимальный состав шихты по результатам предварительных исследований приведен в табл. 1 [1].

Таблица 1

Оптимальный состав шихты по результатам предварительных исследований

Наименование компонента	Состав шихты без добавки, мас. %	Влажность компонентов шихты, %	
Суглинок	88–89	18,30	18,50
Уголь	7–8	10,50	11,20
Лом брикетов	2–3	49,66	46,12
Возврат	10	–	–

Результаты проведенных исследований показали, что прочность и плотность аглопорита с добавлением фрезерного торфа соответствуют республиканским стандартам. Зависимость плотности аглопорита от размера его фракций, полученных согласно техническим условиям, показана на рис. 1.

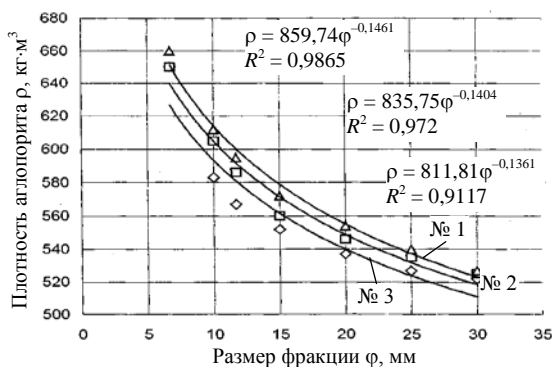


Рис. 1. Зависимость плотности аглопорита от размера его фракций

Основной особенностью применяемых для производства аглопорита ленточных агломерационных машин является прямоточное движение дымовых газов и нагреваемого материала. При математическом моделировании тепловой работы ленточной агломерационной машины СМ-961 [2] с толкающим приводом необходимо учитывать, что в начальный период расчета происходит испарение гигроскопической влаги при температуре до 100 °С. Так как машина может работать на исходном сырье любого вида и при всех диапазонах производительности, принятых в типовых технологиях, особую роль в расчетах играют необходимая площадь спекания и длина ленты машины. Следует отметить некоторые сложности при моделировании на первом этапе агломерации, связанные с сопряженным тепло- и массопереносом внутри материала и закономерностями тепло- и массообмена с окружающей средой.

Весь процесс сушки при температуре среды  $T_c$ , влажности воздуха  $W$  и скорости движения  $v$  можно разделить на два периода:

1) постоянной скорости сушки, когда изменение температуры объекта во времени  $\tau$  постоянно

$\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} = \text{const}\right)$  и скорость изменения

влажностного содержания постоянна  $\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} = \text{const}\right)$ ;

2) падающей скорости сушки, когда скорость изменения влажностного содержания убывает

$\left(\frac{\partial W}{\partial \tau} < 0\right)$ , а температура тела непрерывно воз-

растает  $\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} > 0\right)$ .

Переход от первого периода ко второму характеризуется критическим влажностным содержанием на поверхности объекта  $W_k$ , которое для многих материалов близко к максимальному сорбционному влажностному содержанию. Это характерно для мягких режимов сушки при не слишком больших значениях  $T_c$ ,  $v$  и значительном начальном влажностном содержании.

Процесс сушки при первом этапе агломерации при постоянной скорости в условиях постоянства давления ( $p = \text{const}$ ) характеризуется условиями [3]:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial W}{\partial \tau} = -\frac{q_m}{\rho R}, \quad (1)$$

где  $q_m$  – интенсивность сушки, равная плотности потока влаги у поверхности тела;  $\rho$  – плотность материала;  $R$  – отношение объема тела к его поверхности.

Учитывая то, что длина агломерационной машины значительно превышает высоту палет, рассмотрим систему дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса с учетом (1) в виде:

$$\begin{cases} a_q \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon r q_m}{c_q \rho R} = 0; \\ a_m \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + a_m \delta \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{q_m}{\rho R} = 0, \end{cases} \quad (1) \quad (2)$$

где  $a_q, a_m$  – коэффициенты теплопроводности тепло- и массопереноса;  $\varepsilon$  – критерий испарения;  $r$  – характерный размер;  $c_q$  – удельная теплоемкость;  $\delta$  – термоградиентный коэффициент.

Для такого описания процесса известно [4], что распределение температуры и влагосодержания внутри тела описывается параболической функцией:

$$W = W_{\text{ц}} - \frac{x^2}{R^2} (W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}); \quad (4)$$

$$T = T_{\text{ц}} + \frac{x^2}{R^2} (T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}), \quad (5)$$

где индексы «ц» и «п» соответственно обозначают центр и поверхность объекта.

Перейдем к безразмерным величинам, используя критерии:  $Ki_m = \frac{q_m R}{a_m \rho \Delta W}$  – массооб-

менный критерий Кирпичёва;  $Ko = \frac{r \Delta W}{c_q \Delta T}$  –

критерий Коссовича;  $Lu = \frac{a_m}{a_q}$  – критерий ин-

тенсивности распространения полей потенциала массопереноса относительно поля темпера-

тур;  $Pn = \frac{\delta \Delta T}{\Delta W}$  – критерий Поснова, где  $\Delta T$  и  $\Delta W$  – заданные постоянные для  $T$  и  $W$ .

Решение системы (2), (3) при условиях (4), (5) примет вид [5]:

$$\begin{cases} W = \frac{W_{\text{ц}} - W_{\text{п}}}{\Delta W} = \frac{1}{2} Ki_m (1 + \varepsilon Pn \cdot Ko \cdot Lu); \\ T = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{ц}}}{\Delta T} = \frac{1}{2} Ki_m \varepsilon Ko \cdot Lu. \end{cases} \quad (6) \quad (7)$$

Критерий  $Ki_m$  показывает скорость изменения относительного влагосодержания по относительному времени и в первом периоде сушки равен примерно 0,25, критерий испарения для аглопорита принимается  $\varepsilon = 0,30$ , критерий  $Lu$  характеризует интенсивность распространения влаги в теле по отношению к распространению теплоты и принимается равным 3,00 [6].

Конец первого периода сушки соответствует критическому значению влагосодержания, определяемому величиной

$$W_k = \frac{1}{3} Ki_m (W_0 - W_p),$$

где  $W_0$  и  $W_p$  – начальное и равновесное влагосодержание.

Во втором периоде сушки с падающей скоростью граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} + \alpha [T_c - T(R, \tau)] - r(1 - \varepsilon) \times \\ \times \beta [W(R, \tau) - W_p] = 0; \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} a_m \left[ \frac{\partial W(R, \tau)}{\partial x} + \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} \right] + \\ + \beta [W(R, \tau) - W_p] = 0; \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial W(0, \tau)}{\partial x} = \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \end{cases} \quad (10)$$

где  $\lambda, \alpha, \beta$  – коэффициент теплопроводности, теплоотдачи и массопереноса соответственно.

Распределение влагосодержания и температуры в начальный момент второго этапа описывается в соответствии с формулами (4) и (5). Таким образом, решая систему (6), (7) с граничными условиями (8)–(10) в критериальной форме, получается результат

$$\begin{cases} T = f_1(Fo, Lu, Bi_q, Ko, \varepsilon); & (11) \\ W = f_2(Fo, Lu, Bi_m, Pn, \varphi_k), & (12) \end{cases}$$

где  $Fo = \frac{a\tau}{R^2}$  – критерий Фурье;  $Bi = \frac{\alpha R}{\lambda}$  – критерий Био;  $Bi_q$  – теплообменный и  $Bi_m$  – массообменный.

Влияние критерия  $W_k$  сказывается лишь в начале второго периода [7], затем наступает регулярный режим, при котором интенсивность тепло- и массопереноса не зависит от  $W_k$ , и уравнение будет иметь вид

$$W = f_2\left(FoLu; \frac{Bi_m}{Pn}\right). \quad (13)$$

На основании вышеизложенной математической модели с решением в виде (11)–(13) предложена технология тепловой работы агломерационной машины с расчетом ее длины при заданных скоростях движения палет [8]. Результаты вычислений показали, что скорость сушки зависит от влагосодержания, но не зависит от теплообменного критерия Био. Однако скорость нагревания является функцией и температуры, и  $Bi_q$ . Соотношение (13) показывает, что при разных способах сушки скорость удаления влаги является функцией влагосодержания и комплексного критерия  $\frac{Bi_m}{Pn}$ , причем это имеет место и в первом, и во втором периодах сушки. Следовательно, механизм переноса влаги при различных методах сушки один и тот же (сушка в среде с постоянной и переменной температурой). Температура тела сначала возрастает, затем убывает. До наступления максимального значения температуры температура поверхности повышается интенсивнее, чем температура центра. После прохождения максимального значения температуры поверхности тело начинает остывать, так как температура среды становится меньше температуры поверхности. Прогрев центральных слоев продолжается за счет того, что температура поверхности больше температуры центра. При уравнивании температур тело начинает охлаждаться. В связи с этим важно знать момент наступления максимальной температуры, чтобы правильно разработать технологию сушки. Целесообразно в

момент максимальной температуры прекратить процесс сушки и предоставить возможность выравнивания температур поверхности и центра за счет естественной теплопроводности. Это дает возможность значительной экономии энергоресурсов, затрачиваемых на сушку. Влагосодержание и скорость сушки практически мало изменятся при использовании отключения сушки в момент максимального значения температуры поверхности. Это подтверждает эффективность предложенной технологии и обеспечивает качество продукции при минимальных энерго- и ресурсозатратах [9, 10].

## ВЫВОДЫ

Анализ проведенных исследований показывает, что в технологии получения аглопорита возможны варианты импортозамещения дорогостоящих углей (бурый, каменный, антрацит) на местные виды топлива (фрезерный торф) и его некондиционный продукт. Установлено, что по мере уменьшения крупности топливных частиц повышается восстановительный потенциал продуктов горения и снижается высота окислительной зоны. Это связано с уменьшением степени использования углерода и увеличением абсолютной температуры в зоне горения, что приводит к снижению температурного уровня процесса. Следует отметить, что степень углефикации топлива влияет на возможную скорость спекания шихты и скорость горения топлива.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Березовский, Н. И. Энергоэффективность использования местных видов топлива и ВТЭР в современный период / Н. И. Березовский, В. А. Юрьев // Актуальные проблемы правовых, экономических и гуманитарных наук: матер. науч.-практ. конф., г. Минск, 21 апр. 2011 г. – Минск: БИП-С Плюс, 2011. – С. 129–130.
2. Строительные машины: справ.: в 2 т. / В. Н. Лямин [и др.]. – М., 1991. – Т. 2: Оборудование для производства строительных материалов и изделий. – 503 с.
3. Воронова, Н. П. Математическое моделирование энергосберегающих режимов нагрева, сушки и термообработки / Н. П. Воронова. – Минск: БНТУ, 2006. – 86 с.
4. Лыков, А. В. Теоретические основы строительной теплофизики / А. В. Лыков. – Минск: Изд-во АН БССР, 1961. – 519 с.

5. **Основин, В. Н.** Справочник по строительным материалам и изделиям / В. Н. Основин, Л. В. Шуменов, Д. С. Дубяго. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2005. – 448 с.

6. **К вопросу** использования местных видов топлива в производстве пористых строительных материалов / Н. И. Березовский [и др.] // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 9-й Междунар. конф. Т. 2. – Минск: БНТУ, 2013. – С. 366–372.

7. **Рациональное** использование твердых горючих ископаемых при производстве аглопорита / Н. П. Воронова [и др.] // Инновация 2013: материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Ташкент, 2013. – С. 137–138.

8. **Березовский, Н. И.** Разработка инновационных технологий / Н. И. Березовский, С. Н. Березовский, Б. В. Лесун. – Минск: БИП, 2013. – 84 с.

9. **Обогащение** и комплексное использование минеральных ресурсов / Н. И. Березовский [и др.]. – Минск: БИП, 2012. – 91 с.

10. **Лесун, Б. В.** К вопросу использования местных видов топлива в коммунально-бытовых целях / Б. В. Лесун, С. М. Грибкова, Е. С. Драгун // Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики: материалы 9-й Междунар. конф. / науч. рук. Н. И. Березовский. – Минск: БНТУ, 2013. – 74 с.

#### REFERENCES

1. **Berezovsky, N. I., & Yuriev, V. A.** (2011) Energy Efficiency in Application of Local Fuel Types and Secondary Fuel-Energy Resources in the Modern Period. *Aktual'nye Problemy Pravovyykh, Ekonomicheskikh i Gumanitarnyykh Nauk: Materialy Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [Actual Problems of Legal, Economic and Humanitarian Sciences: Proceedings of Scientific and Practical Conference, Minsk, April 21, 2011]. Minsk, BIP-S Plus. 129–130 (in Russian).

2. **Liamin, V. N., Gorbovets, M. N., & Bykhovskii, I. I.** (1991) *Construction Machinery. Vol. 2: Equipment for Production of Construction Materials and Items*. Moscow, Mashinostroenie. 503 p. (in Russian).

3. **Voronova, N. P.** (2006) *Mathematical Simulation of Energy Saving Modes for Heating, Drying and Heat Treatment*. Minsk: BNTU. 86 p. (in Russian).

4. **Lykov, A. V.** (1961) *Theoretical Principles of Construction Thermophysics*. Minsk: AS BSSR Publishing House. 519 p. (in Russian).

5. **Osnovin, V. N., Shumenov, L. V., & Dubiago, D. S.** (2005) *Reference Book for Construction Materials and Items*. Rostov-on-Don, Feniks. 448 p. (in Russian).

6. **Berezovskii, N. I., Voronova, N. P., Kostiukevich, E. K., Gribkova, S. M., & Lesun, B. V.** (2013) To the Problem on Application of Local Fuel Types in the Production of Porous Construction Materials. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i Ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: Materialy 9-i Mezhdunarodnoi Konferentsii: Sbornik Nauchnykh Trudov. T. 2* [Social and Economic and Ecological Problems of Mining Industry, Construction and Power Engineering. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference. Collection of Research Papers. Vol. 2]. Minsk: BNTU. 366–372 (in Russian).

7. **Voronova, N. P.** (2013) Rational Utilization of Solid Fossil Fuels While Producing Agloporite. *Innovatsiia 2013: Materialy Mezhdunarodnoi Nauchno-Prakticheskoi Konferentsii* [Innovation 2013: Proceedings of International Scientific-Practical Conference: Collection of Research Papers]. Tashkent. 137–138 (in Russian).

8. **Berezovsky, N. I., Berezovsky, S. N., & Lesun, B. V.** (2013) *Development of Innovative Technologies*. Minsk, BIP. 84 p. (in Russian).

9. **Berezovsky, N. I., Berezovsky, S. N., & Lesun, B. V.** (2012) *Beneficiation and Complex Utilization of Mineral Resources*. Minsk, BIP. 91 p. (in Russian).

10. **Lesun, B. V., Gribkova, S. M., & Dragun, E. S.** (2013) To the Problem on Application of Local Fuel Types in Municipal and Public Utility Sphere. *Sotsial'no-Ekonomicheskie i Ekologicheskie Problemy Gornoj Promyshlennosti, Stroitel'stva i Energetiki: Materialy 9-i Mezhdunarodnoi Konferentsii: Sbornik Nauchnykh Trudov. T.1* [Social and Economic and Ecological Problems of Mining Industry, Construction and Power Engineering. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference. Collection of Research Papers. Vol. 1]. Minsk: BNTU. 74 (in Russian).

Поступила 08.08.2013