

ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ДЛЯ ТЕПЛОВОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ

Нияковский А.М.¹⁾, к.т.н.,
ORCID 0000-0001-5106-6278, a.m.niyakovski@pdu.by
Романюк В.Н.²⁾, д.т.н., профессор,
rvn_bntu@rambler.ru

¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Беларусь)

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Беларусь)

***Аннотация.** Рассмотрены актуальные вопросы выполнения эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий и теплотехнологических установок для их осуществления. Сформулированы основные эксергетические показатели для оценки энергетической эффективности таких процессов и установок. Приведены основные математические зависимости, позволяющие выполнять их расчет.*

***Ключевые слова:** экономия топлива, энергетическая эффективность, показатели энергетической эффективности, эксергия, эксергетический анализ, теплотехническое оборудование, тепловая обработка бетонных изделий.*

EXERGETIC EFFICIENCY INDICATORS OF HEAT TECHNOLOGY INSTALLATIONS FOR HEAT TREATMENT OF CONCRETE PRODUCTS

Niyakovskii A.M.¹⁾, Ph.D. of Eng. Sc., Associate Professor,
ORCID 0000-0001-5106-6278, a.m.niyakovski@pdu.by
Romaniuk V.N.²⁾, Dr. habil. in Eng. Sc., Professor,
rvn_bntu@rambler.ru

¹⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

²⁾Belarusian national technical University (Minsk, Republic of Belarus)

***Abstract.** The current issues of performing exergetic analysis of the processes of heat treatment of concrete and reinforced concrete products and heat technology installations for their implementation are considered. The main exergetic indicators for evaluating the energy efficiency of such processes and installations are formulated. The main mathematical dependencies that allow performing their calculation are given.*

***Key words:** fuel economy, energy efficiency, energy efficiency indicators, exergy, exergy analysis, heat technology installations, heat treatment of concrete products.*

Эксергетический анализ тепловых процессов в технологических установках является универсальным инструментом, позволяющим выбрать наиболее энергоэффективные варианты из некоторого их дискретного множества. В отличие от других показателей энергетической эффективности, например, удельных расходов топлива на единицу сырья или готовой продукции, эксергетические показатели учитывают энергетические затраты на всех эта-

пах технологического передела и позволяют судить о рациональности построения технологической цепочки с термодинамической точки зрения [1, 2]. Рациональное построение теплотехнологической системы позволяет сократить затраты первичного топлива и, как следствие, снизить углеродный след, уменьшить негативное влияние теплотехнологий на окружающую среду.

Эксергетические превращения, имеющие место в ходе тепловой обработки бетонных изделий, могут быть представлены диаграммой, приведенной на рис. 1.

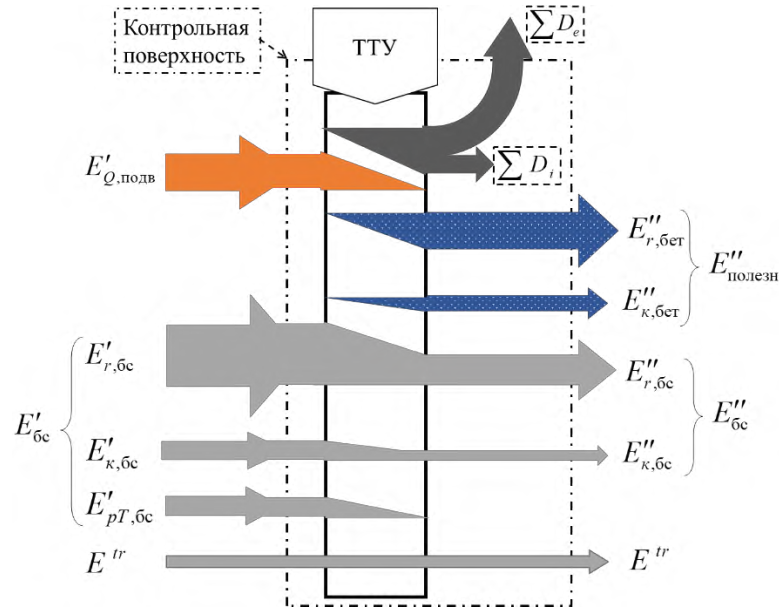


Рис. 1. Эксергетические превращения в процессе тепловой обработки бетонного изделия (пояснения к рисунку даны после формулы (2))

Эксергетический баланс процесса тепловой обработки выражается уравнением:

$$E'_{гс} + E'_{Q,подв} + E^{tr} = (E''_{г,бет} + E''_{к,бет}) + E''_{гс} + E^{tr} + \sum D_e + \sum D_i. \quad (1)$$

На основании эксергетических потоков, показанных на рис. 1, могут быть сформулированы следующие эксергетические показатели энергоэффективности:

- *степень термодинамического совершенства системы* тепловой обработки бетонного изделия в установке ускоренной гидратации может быть записана в следующем виде:

$$\nu = \frac{\sum E''}{\sum E'} = \frac{E''_{полезн} + E''_{гс} + E^{tr}}{E'_{Q,подв} + E'_{гс} + E^{tr}} = \frac{(H/100) \cdot \psi \cdot e_{г,бет} \cdot M_{бет} \cdot \gamma \cdot \phi + \left(1 - \frac{H}{100}\right) \cdot e_{гс} \cdot M_{бет} + E^{tr}}{E'_{Q,подв} + E'_{гс} + E^{tr}}, \quad (2)$$

где $E'_{полезн}$ – полезная эксергия твердеющего бетона, МДж; $E'_{Q,подв}$ – подведенный извне при тепловой обработке поток эксергии, МДж; $E'_{гс}$ и $E''_{гс}$ – эксергия потока бетонной смеси соответственно на входе и выходе теплотехнологической установки, МДж; E^{tr} – сумма эксергий компонентов бетонного изделия, не участвующих в физико-химических превращениях, МДж; H – степень гидратации бетона в изделии, достигнутая к моменту окончания обработки, %; ψ – коэффициент, учитывающий неполноту протекания реакции гидратации; $e_{г,бет}$ – удельная массовая реакционная эксергия твердеющего бетона, МДж/кг; $M_{бет}$ – масса бетона в изделии, кг; γ – массовая доля активной части цементного клинкера в цементе; ϕ – массовая доля продуктов гидратации в затвердевшем бетоне, определяемая из материального баланса реакции гидратации как сумма массовых долей цемента и воды в бетонной

смеси; $E_{r, \text{бс}}$, $E_{k, \text{бс}}$, $E_{pT, \text{бс}}$ – соответственно реакционная, концентрационная и термомеханическая составляющие эксергии бетонной смеси, МДж; $\sum D_e$ и $\sum D_i$ – соответственно внешние и внутренние потери эксергии, МДж; индекс (') – на входе, индекс (") – на выходе системы.

– *термодинамический КПД_e системы:*

$$\eta_e = \frac{\sum E'' - \sum E^{tr}}{\sum E' - \sum E^{tr}} = \frac{(H/100) \cdot \psi \cdot e_{r, \text{бет}} \cdot M_{\text{бет}} \cdot \gamma \cdot \varphi}{E'_{Q, \text{подв}} + E'_{\text{бс}} \cdot H/100}; \quad (3)$$

– *степень технологического совершенства системы:*

$$\beta = 1 - \frac{\sum E^{tr}}{\sum E'} = 1 - \frac{(1 - H/100) \cdot E'_{\text{бс}} + E^{tr}}{E'_{Q, \text{подв}} + E'_{\text{бс}} + E^{tr}}. \quad (4)$$

Расчет величины эксергии подведённого теплового потока $E'_{Q, \text{подв}}$, а также степени гидратации H , фигурирующих в приведённых выше уравнениях, применительно к рассмотренным процессам может быть выполнен с использованием математического обеспечения, разработанного авторами данной статьи с соавторами [3–7].

Выполненные по формулам (2)–(4) расчеты показывают, что величина эксергетического КПД_e системы тепловой обработки (применительно к некоторому условному изделию) составляет от 18,9 до 81,7 %, в зависимости от учета величины затрат эксергии на создание требуемого дисперсного состава цемента.

Выводы. Предложены основные эксергетические показатели, позволяющие осуществить выбор энергоэффективных режимов тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий в теплотехнологических установках из дискретного множества возможных вариантов.

Литература

1. Brodyanskii V. M., Sorin M. V. (1985) Principles for determining the efficiency of technical systems for energy and substance conversion. *Energetika. Izvestiya vuzov = Power engineering. News of higher educational institutions. No 1*, 60–65 (in Russian).
2. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mixalek K. (1998) *The exergetic method and its applications. Moscow, Energoatomizdat Publ.*, 288 (in Russian).
3. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Improving the Energy Efficiency of Heat-Technical Equipment on the Basis of Numerical Simulation of Non-Stationary Processes. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (2) 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
4. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkovich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Science and Technique.* 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
5. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Yatskevich Yu. V., Chichko A. N. (2019) Discrete Optimization of Software-Controlled Modes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat-Technological Facilities. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (3) 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
6. Niyakovskii A.M., Romaniuk V.N., Chichko A.N., Yatskevich Yu.V. The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *ENERGETIKA. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations.* 2019;62(4):327-324. (In Russ.) <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-327-324>.
7. Niyakovskii A. M., Ramaniuk U. N., Chychko A. N., Yatskevich Yu. V. Unsteady model of the hydration process of a reinforced concrete product at software-controlled heating. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 4, pp. 496–505 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.