

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274>

УДК 620.9: 658.26: 666.97.035.5

Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках

Часть 1

В. Н. Романюк¹⁾, А. М. Нияковский²⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республик Беларусь),

²⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021
Belarusian National Technical University, 2021

Реферат. Эксергетический метод термодинамического анализа сложных теплоэнергетических систем в последние годы получил широкое признание, доказав свою эффективность при поиске оптимальных вариантов энергоснабжения и энергопотребления. Вместе с тем его применение сдерживается отсутствием соответствующих научно обоснованных методических подходов к теплотехнологиям, в ходе которых имеют место не только энергетические, но и материальные превращения. Тепловая обработка бетонных и железобетонных изделий относится именно к таким технологиям. В данной статье представлены новые научные результаты, связанные с разработкой эксергетических балансов процессов приготовления бетонной смеси в смесителе и тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке. Для каждого из этих случаев осуществлен анализ эксергетических потоков, определена структура эксергии бетонной смеси и твердеющего бетона. На основе анализа научных работ о химическом составе цементных клинкеров, цементов и продуктов гидратации предложены новые зависимости для расчета эксергии потока бетонной смеси и бетона при его тепловой обработке, включая термомеханическую, реакцию и концентрационную составляющие. Разработаны абсолютные эксергетические показатели. На конкретном примере с использованием разработанного научно-методического обеспечения выполнен расчет указанных величин. Во второй части будут опубликованы результаты исследования по определению относительных эксергетических показателей, позволяющих выполнять оценку энергетической эффективности процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Полученные результаты могут использоваться при выборе энергосберегающих режимов теплотехнологического оборудования для промышленной тепловой обработки бетонных изделий.

Ключевые слова: теплотехнологии, теплотехнологические установки, энергоэффективность, тепловая обработка бетонных изделий, эксергия бетона, эксергетический баланс, эксергетические критерии энергетической эффективности

Для цитирования: Романюк, В. Н. Научно-методические основы эксергетического анализа процессов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках. Часть 1 / В. Н. Романюк, А. М. Нияковский // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2021. Т. 64, № 3. С. 259–274. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274>

Адрес для переписки

Романюк Владимир Никанорович
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Address for correspondence

Romaniuk Vladimir N.
Belarusian National Technical University
65/2, Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 293-92-16
pte@bntu.by

Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations

Part 1

V. N. Romaniuk¹⁾, A. M. Niyakovskii²⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Abstract. Having proven its effectiveness in finding the best options for energy supply and energy consumption the exergetic method of thermodynamic analysis of complex heat and power systems has been widely recognized in recent years. However, its application is hindered by the lack of appropriate scientific and methodological heat technology support, especially if their application involves not only transformation of energy, but also transformation of substances. Heat treatment of concrete and reinforced concrete products belongs to such technologies. This article presents new scientific results related to the development of exergetic balances of the processes of preparation of concrete mixture in a mixer and heat treatment of a concrete product in a heat-technological installation. For each of these cases, the analysis of exergetic flows was carried out, the structure of the exergy of the concrete mixture and the hardening concrete was determined. Based on the analysis of the literature data on the chemical composition of cement clinkers, cements, and hydration products, new dependences have been proposed for calculating the exergy of the concrete mixture flow and the exergy of concrete under its heat treatment, including all their components, viz. thermomechanical, reaction, and concentration constituents. Absolute energy indicators have been developed. The calculation of the mentioned values was performed on a specific example with the use of the developed scientific and methodological support. In the second part of this paper, the results of the study related to the determination of relative exergetic indicators that allow evaluating the energy efficiency of the processes of heat treatment of concrete products in heat technology installations will be published. The results obtained in this paper can be used for the selection of energy-saving modes of heat-technological equipment intended for industrial heat treatment of concrete products.

Keywords: heat technology, thermal technological equipment, energy efficiency, heat treatment of concrete products, exergy of concrete, exergetic balance, exergetic criteria of energy efficiency

For citation: Romaniuk V. N., Niyakovskii A. M. (2021) Scientific and Methodological Bases of Exergetic Analysis of the Processes of Heat Treatment of Concrete Products in Heat Technology Installations. Part 1. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 64 (3), 259–274. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-3-259-274> (in Russian)

Введение

Применение эксергетического метода термодинамического анализа требует учета особенностей конкретной теплотехнологии. В ряде работ [1–5] предпринимались попытки выполнить эксергетический анализ теплотехнологии изготовления бетонных смесей и бетонных изделий, однако задачи определения величины полезной эксергии, необходимой для получения бетонных изделий с требуемыми физико-механическими характеристиками, а также нахождения основных составляющих эксергетического баланса остались нерешенными.

Для выполнения количественной оценки термодинамической эффективности технических систем и процессов, используемых при производстве бетонных изделий, необходимо создать соответствующее научно-методическое обеспечение, позволяющее применять эксергетический метод в данной технической области.

Теплотехнологическая установка (ТТУ) для тепловой обработки (ТО) бетонного изделия обеспечивает подвод тепловой энергии к его поверхности в течение заданного времени с целью набора им требуемой распулочной прочности. В процессе ТО происходят технологические превращения, главной особенностью которых являются химические реакции гидратации активных частей цементного клинкера, обладающие экзотермическим эффектом. Образуется сложная система химически и физически прочно взаимосвязанных компонентов, состоящая из новых химических веществ, промежуточных продуктов реакции гидратации, еще непрореагировавших веществ, а также химически нейтральных материалов. После завершения ТО химические реакции не завершаются, а продолжают в течение длительного времени [6–11]. Исходным материальным потоком на входе ТТУ выступает бетонная смесь, состоящая из щебня, песка, цемента и воды, соединенных в заданных пропорциях в смесителе. Бетонная смесь, как и бетон, является сложной физико-химической многокомпонентной системой.

Цель первой части данной статьи – представить разработку эксергетических балансов и обоснование зависимостей, позволяющих осуществлять расчет абсолютных эксергетических показателей, эксергии бетонной смеси и твердеющего бетонного изделия при ТО в ТТУ. Во второй части будут предложены аналитические зависимости для расчета относительных эксергетических показателей и оценки энергетической эффективности режимов работы теплотехнологического оборудования при промышленной ТО бетонных изделий в ТТУ.

Определение эксергии бетонной смеси

Удельная массовая эксергия потока бетонной смеси может быть представлена суммой слагаемых [12–15]

$$e_{\text{бс}} = e_{r,\text{бс}} + e_{k,\text{бс}} + e_{pT,\text{бс}}, \quad (1)$$

где $e_{r,\text{бс}}$, $e_{k,\text{бс}}$, $e_{pT,\text{бс}}$ – реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии бетонной смеси, кДж/кг.

Приготовление бетонной смеси заключается в соединении составляющих ее твердых компонентов с водой и их перемешивании в смесителях циклического действия (60–150 с). При соединении цемента и воды начинается реакция гидратации цементного клинкера. Однако в первый час такого взаимодействия гидратации подвергается не более 1 % от общего количества цемента [6, 8], что позволяет при вычислении реакционной составляющей эксергии бетонной смеси вынести весь эффект химических

превращений за пределы смесителя, целиком отнеся его на стадию ТО бетонного изделия. Погрешность, связанная с таким упрощением, значительно меньше погрешности исходных данных и погрешности определения химической составляющей эксергии. Схема эксергетических превращений при получении бетонной смеси в смесителе представлена на рис. 1. Контрольная поверхность выбрана по границам активной зоны смесителя.

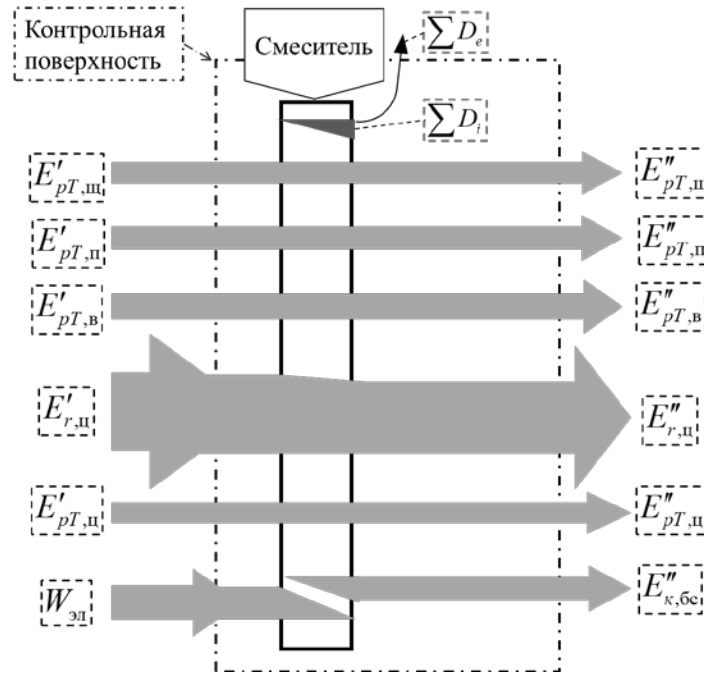


Рис. 1. Эксергетические превращения в процессе приготовления бетонной смеси в смесителе

Fig 1. Exergetic transformations during the production of concrete mix in the mixer

На рис. 1 использованы следующие обозначения: $E_{pT,щ}$, $E_{pT,п}$, $E_{pT,в}$, $E_{pT,ц}$ – термомеханические составляющие эксергии потоков щебня, песка, воды и цемента соответственно, кДж; $E_{r,ц}$ – реакционная составляющая эксергии потока цемента, кДж; $E_{к,бс}$ – концентрационная составляющая эксергии потока бетонной смеси, кДж; $W_{эл}$ – механическая энергия, подводимая к смесителю, кДж; $\sum D_e$, $\sum D_i$ – внешние и внутренние потери эксергии соответственно, кДж; индекс (') – на входе; индекс (") – на выходе.

Как следует из рис. 1 и принятых допущений, эксергия готовой бетонной смеси формируется за счет составляющих эксергии входных потоков цемента, воды, щебня и песка, а также концентрационной составляющей, обусловленной механической работой, подведенной к компонентам бетонной смеси. При этом изменения реакционной составляющей эксергии цемента и термомеханической составляющей эксергии компонентов смеси в течение непродолжительного перемешивания можно полагать незначительными.

Удельная массовая концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси $e_{k,бс}$ определяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь компонентов [14, 15]:

$$e_{k,бс} = s_{тк} W_{ад}, \quad (2)$$

где $s_{тк}$ – удельная поверхность смеси компонентов бетонного раствора, m^2/kg ; $W_{ад}$ – удельная работа адгезионного взаимодействия, $Дж/m^2$.

Бетонные смеси являются многофазными системами, в которых дисперсионной средой выступает вода, а дисперсной фазой – частицы заполнителя, вяжущего и воздушные включения. Возникающие в них на ранних стадиях взаимодействия (до начала процессов схватывания) обусловлены в основном различными типами адгезионных связей [6, 8–11].

Учитывая непродолжительное время перемешивания в смесителе, а также принимая во внимание вывод об условной неизменности приведенной цементом реакционной составляющей эксергии потока смеси в течение перемешивания, можно заключить, что основным фактором, определяющим термодинамическую работу разделения компонентов бетонной смеси применительно к узлу смешения, является работа адгезионного взаимодействия, обусловленная смачиванием твердой дисперсной фазы водой в самой начальной стадии превращений цемента. Удельная работа адгезионного взаимодействия воды и гладкой поверхности сухого твердого материала в системе «поверхность – вода – воздух» определяется на основании уравнения Дюпре – Юнга или его модификаций [16]

$$W_{ад} = \sigma_{жг} (1 + \cos \theta), \quad (3)$$

где $\sigma_{жг}$ – поверхностное натяжение воды, $Дж/m^2$; θ – краевой угол смачивания воды к поверхности материала.

Следует учесть, что, во-первых, в условиях производства при транспортировке и хранении на поверхности твердых компонентов формируется слой воды за счет адсорбции ее паров из атмосферного воздуха и, во-вторых, поверхность материалов является шероховатой. Для гидрофильной шероховатой поверхности краевой угол смачивания всегда меньше, чем для гладкой. Также вода затворения не является химически чистой, содержит растворенные в ней химические вещества, в том числе поступившие в момент смешения с компонентами бетонной смеси.

В силу указанных факторов действительная работа адгезии не может быть определена однозначно и отличается от величины, следующей из уравнения (3). Работа адгезионного взаимодействия воды с поверхностями минеральных компонентов бетонной смеси при краевых углах смачивания θ , равных $0-90^\circ$, лежит в пределах $W_{ад} = (69 \cdot 10^{-3})-(150 \cdot 10^{-3})$ $Дж/m^2$. Поскольку твердые компоненты бетонной смеси относятся к хорошо смачиваемым материалам, примем для последующей оценки структуры эксергии бетонной смеси величину работы адгезионного взаимодействия равной в рассматриваемых условиях $125 \cdot 10^{-3}$ $Дж/m^2$.

Величина работы адгезионного взаимодействия материалов бетонной смеси в смесителе находится в прямой связи с удельной поверхностью компонентов смеси. Если известен гранулометрический состав заполнителей, то их удельная поверхность может быть выражена в виде суммы по процентному соотношению соответствующих фракций и их удельной поверхности [6, 10].

Расчеты, выполненные на основании сведений о фактическом фракционном составе компонентов, используемых для изготовления бетонных смесей, дают средние численные значения их удельных поверхностей: цемент – 333 м²/кг, песок – 3,08, щебень – 0,173 м²/кг. Удельная поверхность всех твердых компонентов бетонной смеси вычисляется по уравнению

$$s_{\text{тк}} = \sum_{j=1}^n \frac{s_{\text{тк},j} g_{\text{тк},j}}{100}, \quad (4)$$

где $s_{\text{тк},j}$ – удельная поверхность твердого компонента, м²/кг; $g_{\text{тк},j}$ – процентное содержание твердого компонента в смеси твердых компонентов.

Содержание цемента, песка и щебня в бетонной смеси определяется требованиями, предъявляемыми при проектировании состава бетонов. В частности, для бетона общестроительного назначения класса В15 (вода – 199 кг, цемент – 300, песок 714, щебень – 1156 кг) удельная поверхность согласно формуле (4) равна 47,2 м²/кг.

Таким образом, в соответствии с изложенной методикой и принятыми допущениями удельная массовая концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси составит: $e_{\kappa, \text{бс}} = s_{\text{тк}} W_{\text{ад}} = 47,2(125 \cdot 10^{-3}) = 5,90$ Дж/кг.

Термомеханическая составляющая эксергии потока бетонной смеси определяется при неизменном давлении из соотношения [14, 15]

$$e_{pT, \text{бс}} = \sum g_{\text{бс}, j} \left(\bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}} \left((T_{\text{бс}} - T_0) - T_0 \cdot \ln(T_{\text{бс}}/T_0) \right) \right), \quad (5)$$

где $g_{\text{бс}, j}$ – массовая доля компонента в бетонной смеси, кг/кг; $\bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}}$ – удельная массовая изобарная теплоемкость компонента бетонной смеси, средняя в интервале температур от T_0 до $T_{\text{бс}}$, кДж/(кг·К); T_0 , $T_{\text{бс}}$ – температура окружающей среды и бетонной смеси соответственно, К.

В фактических производственных условиях соотношение температуры бетонной смеси и окружающей среды зависит от температуры наружного воздуха и воздуха помещений, твердых компонентов и воды. Интервал возможного изменения температур в этих процессах составляет 5–50 °С.

Удельная массовая изобарная теплоемкость (средняя в интервале 5–50 °С) определяется известным для смесей соотношением по заданному составу и теплоемкости компонентов

$$\bar{c}_{p, \text{бс}} = \sum_{j=1}^n \bar{c}_{p, \text{бс}, j} \Big|_{T_0}^{T_{\text{бс}}} g_{\text{бс}, j}. \quad (6)$$

Для бетона класса В15 удельная изобарная средняя теплоемкость смеси $\bar{c}_{p,бс} = 1,097$ кДж/(кг·К). Следовательно, термомеханическая составляющая эксергии $e_{pT,бс} = 5,42$ кДж/кг.

Реакционная удельная массовая составляющая эксергии потока многокомпонентной системы, к которой следует отнести бетонную смесь, может быть определена [13, 14] как

$$e_{r,бс} = \sum g_{бс,j} e_{\mu,бс,j}, \quad (7)$$

где $e_{\mu,бс,j}$ – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов бетонной смеси, кДж/кг.

Составляющие эксергии инертных материалов (песка и щебня) с учетом их химического состава могут быть приняты равными нулю [17]. Эксергия цемента $e_{цсм}$ должна определяться исходя из его минералогического состава и дисперсности.

На основании экспериментальных данных разных производителей [18] для дальнейших расчетов принят состав клинкера со следующими характеристиками: C_3S – 53 %, C_2S – 21,28, C_3A – 7,66, C_4AF – 12,16, гипс ≈ 5 %. Величины реакционной эксергии веществ определены в соответствии с данными [17] (табл. 1).

Таблица 1

Реакционная составляющая эксергии цемента на усредненный состав цементного клинкера

Reaction constituent of cement exergy on the average composition of cement clinker

Наименование минерала	Обозначение	Содержание в клинкере $g_{кл,j}$ %	Удельная массовая реакционная составляющая эксергии $e_{\mu,кл,j}$ кДж/кг	Реакционная эксергия компонентов $g_j \cdot e_{\mu,кл,j}$ кДж/кг
Алит	C_3S	53,00	2035,0	1078,6
Белит	C_2S	22,20	1500,0	333,0
Алюминат	C_3A	7,66	2540,0	194,6
Целит	C_4AF	12,14	1663,0	201,9
Гипс	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	5,00	-28,7	-1,435
Итого на весь клинкер, $\sum(g_{кл,j} \cdot e_{\mu,кл,j})$		100,00	–	$e_{r,клинк} = 1806,7$

Эксергия готовой цементной смеси представляет сумму реакционной эксергии цементного клинкера и эксергии дисперсного состава цемента [4] с учетом прочих минеральных составляющих, добавляемых в цемент (например, шлак и трепел):

$$e_{цсм} = (e_{r,клинк} + e_{d,цсм})(1 - g_{мин.сост}), \quad (8)$$

где $e_{r,клинк}$ – реакционная эксергия клинкера, кДж/кг; $e_{d,цсм}$ – эксергия на создание заданного дисперсного состава, кДж/кг; $g_{мин.сост}$ – доля прочих компонентов цемента, помимо клинкера.

Согласно результатам исследований [4], величина эксергии цемента является индивидуальной характеристикой каждой его партии и находится в пределах 7000–10000 кДж/кг, что в 4–5 раз превышает реакцию эксергию цементного клинкера. Прирост эксергии готовой цементной смеси по сравнению с эксергией клинкера обусловлен потоком механической работы, затраченной на помол клинкера до нужной степени дисперсности. В рассматриваемом примере с учетом данных [4] для дальнейших расчетов примем, что для среднего состава цементной смеси величина эксергии цемента $e_{\text{це}} = 8000$ кДж/кг.

Таким образом, если принять в расчет, что химическая эксергия песка и щебня равна нулю, удельная массовая эксергия потока бетонной смеси может быть определена из уравнения

$$e_{\text{бс}} = e_{\text{це}} g_{\text{це}} + e_{\text{к,бс}} + e_{\text{рТ,бс}}, \quad (9)$$

где $g_{\text{це}}$ – массовая доля цемента в бетонной смеси, кг/кг.

Для бетона класса В15 массовая доля цемента $g_{\text{це}} = 0,1266$ кг/кг. В итоге эксергия бетонной смеси, покидающей смеситель, составит $0,1266 \cdot 8000 + 5,90 + 5,42 \cdot 10^{-3} = 1018,7$ кДж/кг с учетом затрат на измельчение и $0,1266 \cdot 1816,7(1 - 0,05) + 5,90 + 5,42 \cdot 10^{-3} = 223,2$ кДж/кг без учета этих затрат (здесь 0,05 – доля прочих компонентов в цементе, помимо клинкера).

В полученной величине эксергии бетонной смеси составляющая, привнесенная цементом, на несколько порядков превышает остальные слагаемые. Таким образом, можно ограничиться достигнутой точностью полученного решения в отношении концентрационной и термомеханической составляющих эксергии и признать приемлемыми сделанные ранее допущения при их определении.

Эксергия потока бетонной смеси, используемой для формовки бетонного изделия, выражается уравнением

$$E'_{\text{бс}} = e_{\text{бс}} M_{\text{бет}}, \quad (10)$$

где $M_{\text{бет}}$ – масса бетона, кг.

Указанная эксергия представляет собой компоненту эксергетического входа в ТТУ, предназначенную для формовки и ускоренной гидратации цемента. Из выполненных расчетов следует, что эксергия цемента является одним из главных энергетических ресурсов в ходе технологических преобразований вещества в процессе ТО в ТТУ.

Определение эксергии бетонного изделия

Бетонное изделие формируется и подвергается в ТТУ тепловой обработке, благодаря которой бетон набирает назначенную прочность в заданное время. Набор прочности обеспечивается протеканием реакций гидратации активной части цементного клинкера, в результате чего образуется твердый цементный камень. Тепловая обработка ускоряет набор прочности.

При достижении бетоном в изделии распалубочной прочности процесс ТО считается завершенным, однако набор прочности продолжается путем естественного твердения за счет остаточной реакционной способности бетонного раствора, но уже за пределами ТТУ. Схема эксергетических потоков в ходе ТО в ТТУ показана на рис. 2. Контрольная поверхность выбрана по границам отформованного бетонного изделия, находящегося в пределах объема, ограниченного рабочими плоскостями ТТУ.

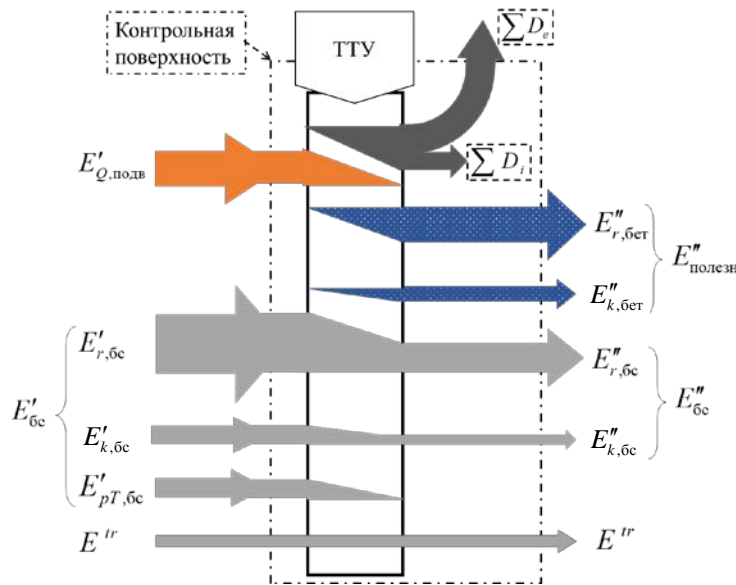


Рис. 2. Эксергетические превращения в процессе тепловой обработки бетонного изделия в теплотехнологической установке

Fig. 2. Exergetic transformations in the process of heat treatment of a concrete product in a heat technology installation

На рис. 2 использованы следующие обозначения: $E'_{Q,подв}$ – эксергия подведенного теплового потока, кДж; $E''_{r,бет}$ – реакционная эксергия продуктов гидратации в изделии, кДж; $E''_{k,бет}$ – концентрационная составляющая эксергии бетона в бетонном изделии, кДж; $E''_{полезн}$ – полезная эксергия бетона в изделии, кДж; $E_{бс}$ – эксергия потока бетонной смеси, кДж; $E_{r,бс}$, $E_{k,бс}$, $E_{pT,бс}$ – реакционная, концентрационная и термомеханическая составляющие эксергии бетонной смеси соответственно, кДж; E^{tr} – транзитная эксергия прочих потоков, кДж; $\sum D_e$, $\sum D_i$ – внешние и внутренние потери эксергии соответственно, кДж; индекс (') – на входе; индекс (") – на выходе. Следует отметить, что внешние потери эксергии обусловлены тепловыми потерями ТТУ в окружающую среду.

Эксергетический баланс процесса ТО в ТТУ выражается уравнением

$$E'_{бс} + E'_{Q,подв} + E^{tr} = (E''_{r,бет} + E''_{k,бет}) + E''_{бс} + E^{tr} + \sum D_e + \sum D_i. \quad (11)$$

Таким образом, эксергия твердеющего бетонного изделия на выходе ТТУ, но после остывания до температуры окружающей среды составляет

$$E''_{\text{би}} = (E''_{r,\text{бет}} + E''_{k,\text{бет}}) + E''_{\text{бс}} + E'' \quad (12)$$

Рассмотрим величины, входящие в (12). Сумма эксергий $E''_{r,\text{бет}} + E''_{k,\text{бет}} = E''_{\text{полезн}}$ ассоциируется с достигнутой к моменту окончания ТО прочностью бетона, величина $E''_{\text{бс}}$ представляет собой эксергию не завершившего гидратацию цемента потока бетонной смеси, потенциал которой будет использован при дальнейшем твердении изделия за пределами ТТУ. Эксергия конечных продуктов гидратации зависит от их реакционных эксергий. Соответствующие сведения представлены в табл. 2, при составлении которой использовались данные работ [5, 7, 17–20].

Таблица 2

Реакционные составляющие эксергии потока продуктов гидратации цемента
Reactionary exergy constituents of the flow of cement hydration products

Наименование продукта	Химическая формула или обозначение	Содержание в цементном камне $g_{h,i}$, %		Удельная массовая реакционная составляющая эксергии $e_{\mu,i}$, кДж/кг
		Пределы изменения	Принято для расчетов в данной работе	
Гидросиликат кальция	C-S-H	50–60	60,0	1178
Гидроксид кальция	Ca(OH) ₂	20–25	25,0	1831
Гидросульф-алюминат кальция	3CaO·Al ₂ O ₃ ·3CaSO ₄ × (31–32)H ₂ O	15–20	15,0	364,9
На весь принятый для расчетов состав			100,0	1219,3

Данные табл. 2 позволяют определить реакционную составляющую удельной массовой эксергии твердеющего бетона $e_{r,\text{бет}}$ и максимальную теоретически возможную реакционную составляющую эксергии бетона $E''_{r,\infty}^{\text{max}}$ на момент полного завершения процесса твердения (при степени гидратации $H = 100\%$):

$$E''_{r,\infty}^{\text{max}} = e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi; \quad (13)$$

$$e_{r,\text{бет}} = \sum_{i=1}^{i=n} (g_{h,i} e_{\mu,i}), \quad (14)$$

где γ – массовая доля активной части цементного клинкера в цементе; φ – то же продуктов гидратации в затвердевшем бетоне, определяемая из материального баланса реакции гидратации как сумма массовых долей цемента и воды в бетонной смеси; $g_{h,i}$ – массовая доля компонента, составля-

ющего смесь продуктов гидратации, в общем количестве продуктов гидратации; $e_{\mu,i}$ – удельная массовая реакционная составляющая эксергии компонентов продуктов гидратации, кДж/кг.

Реакция гидратации цементного клинкера протекает на протяжении всего жизненного цикла бетонного изделия. В силу внутренних потерь реакционной составляющей эксергии бетона, вызванных недостаточным взаимодействием компонентов цемента с водой, максимальная реакционная составляющая эксергии продуктов гидратации в готовом бетонном изделии $E_{r,\infty}^{\max}$ практически не достигается и всегда составляет фактическую величину $E_{r,\infty}^{\text{факт}}$.

Для оценки указанной особенности процесса твердения бетона введем коэффициент ψ , позволяющий учесть неполноту протекания реакции гидратации в результате внутренних потерь эксергии:

$$E_{r,\infty}^{\text{факт}} = \psi E_{r,\infty}^{\max}. \quad (15)$$

Величина коэффициента ψ зависит от качества цемента, а также от соблюдения технологий приготовления бетонной смеси и ТО бетона. В научной литературе отсутствуют однозначные рекомендации по этому поводу. Определение его значения является задачей строительного материаловедения. Однако с достаточной для предварительных расчетов точностью можно принять, что коэффициент $\psi = 0,8\text{--}0,85$.

Концентрационная составляющая эксергии изделия, входящая в уравнение (12), определяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь или раствор компонентов. Связь между прогидратировавшим цементом (вяжущим) и минеральными компонентами твердеющего бетона (щебень и песок) обусловлена силами адгезионного взаимодействия, возникающими при формировании цементного камня [21, 22].

В общем случае работа адгезионного взаимодействия вычисляется по уравнению (2). Однако для ее определения требуется знать удельную работу сил адгезии. В научно-технической литературе в качестве характеристики адгезионного взаимодействия в цементах используются понятия адгезионной прочности или давления адгезии [22], определение величин которых доступно экспериментальными методами. Оценить концентрационную составляющую эксергии можно исходя из работы сил упругой деформации в бетоне. На такую связь между энергетическими и прочностными характеристиками бетона указывал И. Н. Ахвердов [6, с. 425–427]. Расчеты показывают, что предельное значение потенциальной энергии деформации бетонного изделия составляет 0,045 Дж/кг. Из этого следует, что влияние концентрационной составляющей эксергии бетона на эксергетический баланс при ТО незначительное и отдельного уточнения не требует. Это также позволяет полагать, что концентрационной составляющей эксер-

гии твердеющего бетона можно пренебречь в силу ее малости по сравнению с реакционной составляющей.

Транзитная эксергия прочих потоков E^{tr} в (12) является суммой эксергий компонентов, не участвующих в физико-химических превращениях (арматуры, утеплителя, защитных материалов). Их эксергии остаются постоянными или незначительно изменяются в процессе ТО в ТТУ. Таким образом, величина транзитной эксергии может быть принята неизменной и равной начальному значению на эксергетическом входе.

Оценка эффективности ТО в ТТУ должна осуществляться по величине достигнутой прочности изделия, характеризуемой степенью гидратации. Для расчета эксергии бетонного изделия, достигшего теплового равновесия с окружающей средой после завершения ТО, (12) может быть представлено в общем виде, учитывающем степень гидратации цемента и позволяющем вычислять эксергию бетонного изделия после ТО в зависимости от состава и степени гидратации цемента в бетоне (при его охлаждении до температуры окружающей среды):

$$E''_{\text{би}} = \left(\frac{H}{100} \psi e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi + E^{tr} \right) + \left(1 - \frac{H}{100} \right) e_{\text{бс}} M_{\text{бет}}, \quad (16)$$

где H – степень гидратации цемента в изделии, достигнутая к моменту окончания ТО, %; $e_{r,\text{бет}}$ определяется по (14) с использованием данных табл. 2.

В уравнении (16) сумма в первых скобках выражает эксергию бетонного изделия в пределах достигнутой степени гидратации цемента, а произведение после знака сложения показывает эксергию еще не прогидратировавшей бетонной смеси. С позиций оценки энергоэффективности именно первое слагаемое характеризует результат, достигнутый в процессе ТО бетонного изделия в ТТУ:

$$E''_{\text{рез}} = \frac{H}{100} \psi e_{r,\text{бет}} M_{\text{бет}} \gamma \varphi + E^{tr}. \quad (17)$$

Величина эксергии теплового потока, подведенного к бетонному изделию в ТТУ, определяется на основе уравнения термодинамики [11–14]

$$E'_{Q,\text{подв}} = \int_1^2 \tau_e dQ, \quad (18)$$

где dQ – теплота элементарного процесса, кДж; τ_e – безразмерная эксергетическая температура процесса

$$\tau_e = 1 - T_{\text{ос}}/T; \quad (19)$$

T , $T_{\text{ос}}$ – температура в элементарном процессе и окружающей среде соответственно, К.

В случае если величина теплового потока Q и температура в элементарном процессе T принимаются постоянными, уравнение (17) упрощается [12–15]

$$E'_{Q,\text{подв}} = E'_Q = \tau_e Q. \quad (20)$$

Точное решение уравнения (18), а также расчет достигнутой при ТО в ТТУ степени гидратации H могут быть выполнены с использованием математической модели, разработанной авторами данной статьи (совместно с А. Н. Чичко и Ю. В. Яцкевичем) [23–27].

В качестве примера использования разработанной методики определения эксергии бетонной смеси и бетона рассмотрим ТО однородного бетонного изделия объемом 1 м^3 и плотностью 2369 кг/м^3 из бетонной смеси следующего состава: вода – 199 кг, цемент – 300, песок – 714, щебень – 1156 кг. Характеристики используемого цемента соответствуют указанным в табл. 1, содержание и свойства продуктов гидратации приняты согласно табл. 2. В соответствии с (10) исходная эксергия бетонной смеси в сформованном изделии, направляемом на ТО, составит без учета затрат на измельчение клинкера $E''_{\text{св}} = 223,2 \cdot 2369 = 528,8 \text{ МДж}$, а с учетом таких затрат $E''_{\text{св}} = 1018,7 \cdot 2369 = 2413,3 \text{ МДж}$. Эксергия бетонного изделия в результате ТО в соответствии с (17), но без транзитной эксергии ($E^{tr} = 0$) и с учетом (13)–(15) составит при достигнутом значении степени гидратации в 50 %: $E''_{\text{рез}} = 50/100 \cdot 0,8 \cdot 1219,3 \cdot 2369 \cdot 0,95 \cdot 0,2106 + 0 = 231,16 \text{ МДж}$.

ВЫВОДЫ

1. Разработан эксергетический баланс, описывающий эксергетические превращения энергии и вещества в процессе получения бетонной смеси в механическом смесителе, а также при тепловой обработке бетонных изделий в теплотехнологических установках.

2. Предложены аналитические зависимости, позволяющие выполнить расчет эксергии бетонной смеси, эксергии твердеющего бетона и их составляющих при заданных составе бетонной смеси и технологических параметрах тепловой обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коц, І. В. Ексергетичний аналіз теплових процесів технології виготовлення будівельних виробів / І. В. Коц, О. П. Колісник // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2011. Т. 10, № 1. С. 46–48.
2. Атоян, В. Р. Анализ эффективности теплотехнологических схем производства бетонных изделий на основе эксергетического метода / В. Р. Атоян, И. Н. Малый, А. В. Полин // Комплексное использование тепла и топлива в промышленности: межвуз. науч. сб. Саратов, 1995. С. 78–81.
3. Способ управления процессом приготовления бетонной смеси: пат. RU 2334713, МПК В 28В 11/00 / Т. М. Вердиян, Р. Т. Лукманов. Опубл. 27.09.2008.

4. Вердиян, М. А. Эксергетический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента) / М. А. Вердиян, Д. А. Бобров, А. М. Вердиян. М.: РХТУ имени Д. И. Менделеева, 2004. 68 с.
5. Koroneos, C. Exergy Analysis of Cement Production / C. Koroneos, G. Roumbas, N. Mousiopoulos // *International Journal of Exergy*. 2005. Vol. 2, No 1. P. 55–68. <https://doi.org/10.1504/ijex.2005.006433>.
6. Ахвердов, И. Н. Основы физики бетона / И. Н. Ахвердов. М.: Стройиздат, 1981. 464 с.
7. Kermeli, K. Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry: Guide for Energy and Plant Managers / K. Kermeli, E. Worrell, E. Masanet. Berkeley: Berkeley National Laboratory University of California, 2011. 112 p. <https://doi.org/10.2172/1062106>.
8. Химия строительных материалов / Й. Планк [и др.]. Шымкент: Южно-Казахстанский гос. ун-т имени М. Ауэзова, 2016. 221 с.
9. Райхель, В. Бетон: в 2 ч. / В. Райхель; пер. с нем.; под ред. В. Б. Ратинова. М.: Стройиздат, 1979. Ч. 1: Свойства. Проектирование. Испытания. 111 с.
10. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. М.: Изд-во АСВ, 2002. 500 с.
11. Фридрихсберг, Д. А. Курс коллоидной химии / Д. А. Фридрихсберг. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1984. 368 с.
12. Бродянский, В. М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В. М. Бродянский. М.: Энергия, 1973. 296 с.
13. Бродянский, В. М. Принципы определения КПД технических систем преобразования энергии и вещества / В. М. Бродянский, М. В. Сорин // *Изв. высш. учеб. заведений СССР. Энергетика*. 1985. № 1. С. 60–65.
14. Бродянский, В. М. Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек; под ред. В. М. Бродянского. М.: Энергоатомиздат, 1998. 288 с.
15. Романюк, В. Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов / В. Н. Романюк. Минск, 2010. 365 с.
16. Зимон, А. Д. Адгезия жидкости и смачивания / А. Д. Зимон. М.: Химия, 1974. 416 с.
17. Степанов, В. С. Химическая энергия и эксергия веществ / В. С. Степанов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1990. 163 с.
18. Гидравлические вяжущие вещества / И. Н. Кузнецова [и др.]. Омск: СибАДИ, 2012. 74 с.
19. Брыков, А. С. Гидратация портландцемента / А. С. Брыков. СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2008. 30 с.
20. Садрашева, А. О. Гидросиликаты кальция (C–S–H) как основная фаза твердения портландцемента / А. О. Садрашева // *Ползуновский альманах*. 2016. № 3. С. 193–196.
21. Адгезия, клеи, цементы, припои / под ред. Н. Дебройна, Р. Гувинка; пер. с англ. А. Л. Козловского. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 584 с.
22. Усов, Б. А. Химизация бетона / Б. А. Усов. М.: ИНФРА-М, 2016. 379 с.
23. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 2. С. 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
24. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Няковский [и др.] // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
25. Дискретная оптимизация программно управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 3. С. 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292>.
26. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Няковский [и др.] // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324>.

27. Нестационарная модель процесса гидратации железобетонного изделия, находящегося в программно-нагреваемой среде / А. М. Нияковский [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. 2019. Т. 63, № 4. С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505>.

Поступила 06.01.2021 Подписана в печать 09.03.2021 Опубликована онлайн 31.05.2021

REFERENCES

1. Kots I., Kolesnik O. (2011) Exergy Analysis of Thermal Processes Technology Manufacture of Building Products. *Suchasni Tekhnologii, Materiali i Konstruktsii v Budivnitstvi = Modern Technologies, Materials and Design in Construction*, 1 (10), 46–48 (in Ukrainian).
2. Atoyán V. R., Malý I. N., Polín A. V. (1995) Analysis of the Efficiency of Heat-Technological Schemes for the Production of Concrete Products Based on the Exergetic Method. *Kompleksnoe Ispol'zovanie Tepla i Topliva v Promyshlennosti: Mezhvuz. Nauch. Sb.* [Integrated Use of Heat and Fuel in Industry: Interuniversity Scientific Collected Papers]. Saratov, 78–81 (in Russian).
3. Verdiyán T. M., Lukmanov R. T. (2008) *Method for Controlling the Process of Preparing a Concrete Mixture*. Patent RU No 2334713 (in Russian).
4. Verdiyán M. A., Bobrov D. A., Verdiyán A. M. (2004). *Exergetic Analysis of Chemical Technology Processes (on the Example of Cement Technology)*. Moscow, Mendeleev University of Chemical Technology. 68 (in Russian).
5. Koroneos C., Roumbas G., Moussiopoulos N. (2005) Exergy Analysis of Cement Production. *International Journal of Exergy*, 2 (1), 55–68. <https://doi.org/10.1504/ijex.2005.006433>.
6. Akhverdov I. N. (1981) *Fundamentals of Concrete Physics*. Moscow, Stroiizdat Publ. 464 (in Russian).
7. Kermeli K., Worrell E., Masanet E. (2011) *Energy Efficiency Improvement and Cost Saving Opportunities for the Concrete Industry: Guide for Energy and Plant Managers*. Berkeley, Berkeley National Laboratory University of California Publ. 112. <https://doi.org/10.2172/1062106>.
8. Plank J., Taimasov B. T., Shtefan D., Khirsh K., Zhakipbaev B. E. (2016) *Chemistry of Building Materials*. Shymkent, South Kazakhstan State University named after M. Auezov. 221 (in Russian).
9. Raikhel' V. (1979) *Concrete. Part 1: Properties. Design. Testing*. Moscow, Stroiizdat Publ. 111 (in Russian).
10. Bazhenov Y. M. (2002) *Technology of Concrete*. Moscow, ASV Publ. 500 (in Russian).
11. Fridrikhsberg D. A. (1984) *Colloid Chemistry Course*. 2nd ed. Leningrad, Khimiya Publ. 368 (in Russian).
12. Brodyanskii V. M. (1973) *Exergetic Method of Thermodynamic Analysis*. Moscow, Energiya Publ. 296 (in Russian).
13. Brodyanskii V. M., Sorin M. V. (1985) Principles for Determining the Efficiency of Technical Systems for Energy and Substance Conversion. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii SSSR. Energetika* [Proceedings of Higher Educational Institutions of the USSR. Energy], (1), 60–65 (in Russian).
14. Brodyanskii V. M., Fratsher V., Mikhalek K. (1998) *The Exergetic Method and its Applications*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 288 (in Russian).
15. Romanyuk V. N. (2010) *Intensive Energy Saving in Heat-Technological Systems of Industrial Production of Building Materials*. Minsk. 365 (in Russian).
16. Zimon A. D. (1974) *Adhesion of Fluid and Wetting*. Moscow, Khimiya Publ. 416 (in Russian).
17. Stepanov V. S. (1990) *Chemical Energy and Exergy of Substances*. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch. 163 (in Russian).

18. Kuznetsova I. N., Rashchupkina M. A., Kosach A. F., Gutareva N. A. (2012) *The Hydraulic Binders*. Omsk, SibADI Publ. 74 (in Russian).
19. Brykov A. S. (2008) *Hydration of Portland Cement*. St.-Petersburg, Saint-Petersburg State Institute of Technology Publ. 30 (in Russian).
20. Sadrasheva A. O. (2016) Calcium Hydrosilicates (C–S–H) as the Main Phase of Hardening of Portland Cement. *Polzunovskii Al'manakh* [Polzunov's Almanac], (3), 193–196 (in Russian).
21. de Bruyne N. A., Houwink R. (1954) *Adhesion and Adhesives*. London, Cleaver-Hume Press. 516.
22. Usov B. A. (2016) *Chemicalization of Concrete*. Moscow, INFRA-M Publ. 379 (in Russian).
23. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191> (in Russian).
24. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yaczkevich Yu. V. (2019) Verification of Non-Stationary Mathematical Model of Concrete Hardening in Thermal Technological Installations. *Nauka i Tekhnika = Science and Technique*, 18 (2), 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
25. 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. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (3), 280–292. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-3-280-292> (in Russian).
26. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products. *Energetika. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324> (in Russian).
27. Niyakovskii A. M., Romaniuk V. N., Chichko A. N., Yatskevich Yu. V. (2019) 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*, 63 (4), 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-4-496-505> (in Russian).