

УДК 658.26:536.7:666.97.035

**РАЗРАБОТКА НАУЧНО-МЕТОДИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭКСЕРГЕТИЧЕСКОГО  
АНАЛИЗА ПРОЦЕССА ТЕПЛОЙ ОБРАБОТКИ БЕТОННЫХ ИЗДЕЛИЙ  
В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ****А.М. НИЯКОВСКИЙ***(Полоцкий государственный университет);**д-р техн. наук, проф. В.Н. РОМАНИЮК**(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

*Рассмотрены вопросы использования методологии эксергетического анализа применительно к теплотехнологиям промышленного производства бетонных изделий. Представлена методика расчёта эксергии бетонной смеси, поступающей в теплотехнологическую установку ускоренной гидратации. Показана взаимозависимость между эксергией бетонной смеси, дополнительными эксергетическими потоками, необходимыми для ускорения реакции гидратации цемента, и временем тепловой обработки изделий. На основе эксергетического метода термодинамического анализа разработан численный критерий, позволяющий осуществлять выбор режимов тепловой обработки бетона по критерию минимальных затрат энергии.*

**Ключевые слова:** *теплоэнергетические системы, энергосбережение, теплотехнологии, термодинамический анализ, эксергия, производство бетонных изделий, установки ускоренной гидратации бетона.*

**Введение.** Рационализация потребления энергии в сложных производственных системах предполагает внедрение эффективных теплоэнергетических систем промышленных предприятий (ТЭСПП), разработка которых осуществляется на основе методов интенсивного энергосбережения, обеспечивающих минимизацию затрат топливно-энергетических ресурсов.

Основные положения теории интенсивного энергосбережения в сфере промышленных теплотехнологий представлены в работах А.Д. Ключникова [1; 2], В.М. Бродянского [3], Б.В. Сазанова [4], Б.М. Хрусталёва [5], других исследователей [6; 7] и предусматривают применение системного подхода к анализу ТЭСПП. В свою очередь, как отмечается в [6], системный подход диктует необходимость исследования совокупности технологически взаимосвязанных объектов для выявления полного потенциала энергосбережения. Причём, исходя из принципа единства системы [6], технологические и энергетические вопросы подлежат совместному рассмотрению [7].

Большая часть научных публикаций, посвящённых энергосбережению при производстве бетонных изделий, основывается на методологии материаловедения, науки о бетоне и посвящено в основном технологическим аспектам проектирования оптимальных составов бетонных смесей, формовки, уплотнения и тепловой обработки изделий. При этом особенности протекания тепловых процессов в теплотехнологических установках и самом бетонном изделии практически не рассматриваются или рассматриваются упрощённо. С позиций промышленной теплоэнергетики важно использовать методологию эксергетического анализа (ЭА) для исследования и разработки энергосберегающих методов и технологий тепловой обработки (ТО) бетонных изделий в теплотехнологических установках ускоренной гидратации. Авторами работы [8] предпринята попытка выполнить ЭА тепловых процессов, используемых в технологии изготовления бетонных изделий в пропарочной камере, с целью уменьшения энергозатрат. Однако основные результаты этой работы ограничились построением схемы эксергетических потоков в пределах теплотехнологической установки для проведения ТО и изложением известных положений методологии ЭА, опубликованных в [3; 6; 7]. При этом задача определения величины полезной эксергии, необходимой для получения бетонных изделий с требуемыми физико-механическими характеристиками, а также нахождения основных составляющих эксергетического баланса в работе [8] осталась нерешённой. Методология ЭА при исследовании жизненного цикла минеральных материалов в процессе их превращения в цемент, бетон обсуждена в [9; 10]. Однако в этих работах не были рассмотрены вопросы ТО бетонов в устройствах ускоренной гидратации. Всё это подтверждает актуальность исследований термодинамической эффективности процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках как основы для последующей разработки и формирования энергосберегающих технологий промышленного производства бетонных изделий.

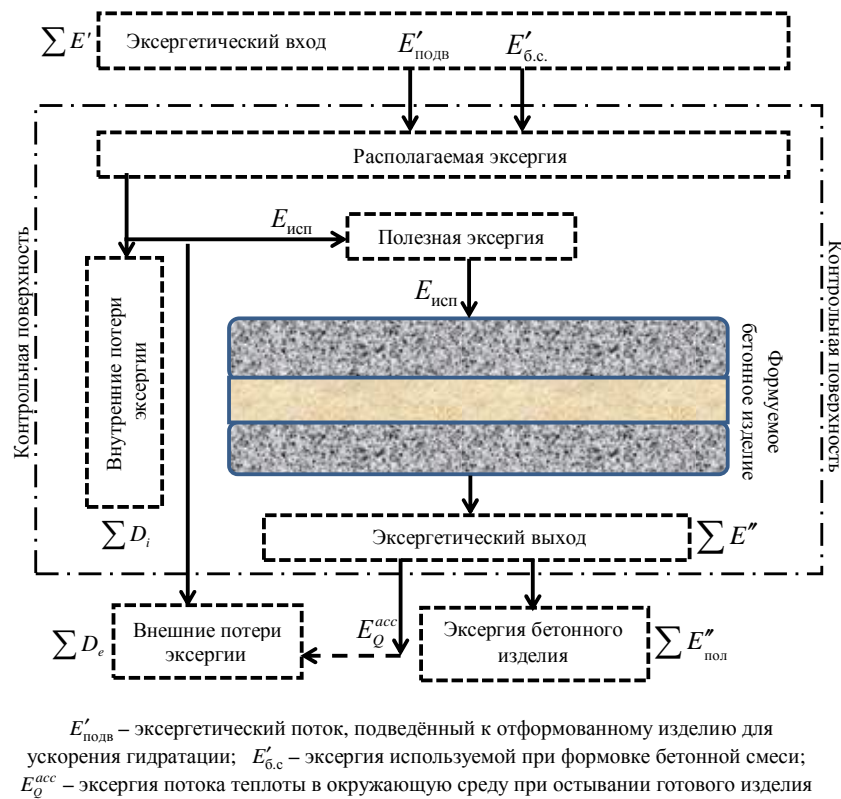
Цель настоящей работы заключается в разработке основных теоретических положений, позволяющих применить метод ЭА к рационализации теплотехнологий, а также к выработке критериев для ранжирования энергопотребления при промышленном производстве бетонных изделий.

**Объект, предмет и методология исследования.** Объектом исследования в данной работе выступают теплотехнологические установки в неразрывном единстве с формируемым и подвергаемым ТО

бетонным изделием, а также режимы ТО бетона. Предметом исследования являются модели и методы, позволяющие выполнить ЭА и произвести выбор рациональных с энергетической точки зрения режимов ТО. Методология ЭА основывается на использовании первого и второго законов термодинамики во взаимосвязи с реальными условиями протекания процессов в рассматриваемой системе с учётом её материального и энергетического балансов. Целевыми функциями оптимизации в зависимости от предметной области анализа, выступают эксергетический КПД<sub>e</sub>, потери эксергии, удельные затраты эксергии и энергозатраты, экономия условного топлива, а также различные экономические показатели, характеризующие эффективность капитальных вложений [1–3].

**Содержание и результаты исследования.** Теплоэнергетическая система промышленных предприятий может быть представлена как совокупность двух подсистем: энергообеспечения и энергопотребления. Вопросы выполнения ТДА и ЭА в отношении первой подсистемы рассмотрены, в частности, в работах [6; 7; 11; 12]. Исследования же термодинамических особенностей тепловой обработки бетонных изделий с позиций эксергетического анализа практически не проводились.

Составляющие эксергетического баланса при осуществлении тепловой обработки бетонного изделия представлены на рисунке 1.



**Рисунок 1. – Схема эксергетических потоков при тепловой обработке бетонного изделия**

Контрольная поверхность выбрана по границам формуемого бетонного изделия. Такой выбор обосновывается следующими соображениями: 1) поток реакционно активной бетонной смеси, участвующий в энергетических превращениях, подаётся на стадию формовки; 2) отформованная бетонная смесь занимает место в ТТУ в пределах объёма, ограниченного поверхностью формы; 3) механическое и тепловое воздействие на изделие с целью ускорения гидратации осуществляется по его внешней поверхности; 4) такой выбор контрольной поверхности позволяет игнорировать внетехнологические потери эксергии, не связанные с ТО бетонного изделия (поверхностью оборудования, трубопроводов и т.п.); 5) готовое бетонное изделие после завершения ТО и распалубки сохраняет свою форму, его теплообмен с окружающей средой происходит по границам поверхности.

Эксергетический поток  $E'_{подв}$ , подводимый к отформованному изделию для ускорения гидратации, включает в себя все возможные виды энергетического воздействия на бетон: механическое  $E_{мех}^{in}$ , тепловое  $E_Q^{in}$  и химическое  $E_{хим}^{in}$ .

Внутренние потери эксергии  $\Sigma D_i$  в процессе ТО связаны, во-первых, с неполнотой процесса гидратации, обусловленной недостаточным взаимодействием между цементом и водой при формировании цементного геля, в результате чего химическая реакция гидратации протекает неполно, часть цемента

в ней не участвует, и изделие не набирает необходимой проектной прочности, а во-вторых, с потерями части энергии при осуществлении механического воздействия на бетон при его уплотнении (если оно проводилось). Внешние потери эксергии  $\sum D_e$  вызваны тепловыми потерями с поверхности изделия в окружающую среду через конструктивные элементы теплотехнологической установки и/или непосредственно в атмосферу в течение времени проведения ТО.

Полезная эксергия  $E_{исп}$  является комплексной величиной, включающей, в частности, эксергию теплового потока  $E_Q^{in}$ , подводимого непосредственно к бетонному изделию в ходе проведения ТО, и поток эксергии бетонной смеси  $E'_{б.с.}$ , расходуемый на создание изделия и достижение им заданной проектной прочности. Затраты теплоты на ТО должны обеспечить набор изделием распалубочной прочности в течение назначенной продолжительности тепловой обработки.

Часть цемента в бетоне после завершения ТО продолжает оставаться реакционно активной, формируя эксергию готового бетонного изделия  $\sum E''_{пол}$ . Эта эксергия в объёме  $E''_{цем}$  расходуется на последующее достижение бетоном проектной прочности в условиях естественной (уже без подведения энергии из внешних источников) выдержки после распалубки. После завершения стадии ТО готовое бетонное изделие естественным образом охлаждается, и аккумулированная в нём эксергия теплового потока  $E_Q^{acc}$  приравнивается к внешним потерям эксергии, если обуславливающая её теплота не утилизируется, а рассеивается в окружающую среду.

Опираясь на разработанную схему эксергетических потоков, можно известное выражение для степени термодинамического совершенства теплоэнергетической системы [6], показывающее полноту использования эксергетического входа системой, записать как

$$v = \frac{\sum E''_{пол}}{E'_{подв} + E'_{б.с.}} \quad (1)$$

При  $E'_{подв} = 0$  твердение бетона носит естественный характер, осуществляется без проведения ТО, и уравнение (1) приобретает вид

$$v^* = \frac{\sum E''_{пол}}{E'_{б.с.}} \quad (2)$$

Показатель  $v^*$  характеризует степень термодинамического совершенства такой идеальной организации процесса ТО, когда цели технической системы достигаются без подвода энергетических потоков к бетонному изделию в ТТУ извне. Разделив почленно уравнение (1) на уравнение (2), можно получить следующее соотношение:

$$\eta = \frac{v}{v^*} = \frac{E'_{б.с.}}{E'_{подв} + E'_{б.с.}} \quad (3)$$

Выполненное преобразование позволило исключить из рассмотрения величину эксергии  $\sum E''_{пол}$ , однозначное определение которой затруднено.

Уравнение (3) позволяет судить о степени термодинамического совершенства технической системы, предназначенной для проведения ТО бетонных изделий в теплотехнологической установке для ускоренной гидратации. Оно показывает, насколько технологически неизбежные энергетические затраты при ускоренной гидратации превышают энергетические затраты, которые приходится нести в естественных условиях твердения бетона (то есть без подвода теплоты извне). Причём уравнение (3) оперирует как локальными, свойственными данной технической системе показателями энергопотребления, так и глобальными, отражающими через эксергию «прошлые» энергетические затраты, например, на получение цемента.

Из всех компонентов эксергетического входа специального исследования требует эксергия бетонной смеси  $E'_{б.с.}$ , для которой следует определить структуру и способ вычисления.

Эксергия бетонной смеси включает все составляющие эксергии для потока вещества [3; 4; 6]:

$$e_{б.с.} = e_{r,б.с.} + e_{k,б.с.} + e_{pT,б.с.}, \text{ кДж/кг}, \quad (4)$$

где  $e_{r,б.с.}$ ,  $e_{k,б.с.}$ ,  $e_{pT,б.с.}$  – соответственно реакционная, концентрационная, термомеханическая составляющие удельной массовой эксергии бетонной смеси, кДж/кг.

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

$$e_{r, \text{бс}} = \sum g_j \cdot e_{\mu, j}, \text{ кДж/кг}, \quad (5)$$

где  $g_j$  – массовые доли компонентов, составляющих бетонную смесь;  $e_{\mu, j}$  – удельные массовые химические составляющие эксергии компонентов бетонной смеси, кДж/кг.

В общем случае бетонная смесь состоит: из соединяемых между собой в смесителе потоков минерального заполнителя (щебня и песка); вяжущего вещества (цемента); химических добавок (пластификаторов, ускорителей твердения); воды. Химическая составляющая эксергии минерального заполнителя (песка и щебня) равна нулю ( $e_{\mu, j} = 0$ ), так как представлена в первую очередь диоксидом кремния  $\text{SiO}_2$ , химическая эксергия которого может быть принята равной нулю [13]. Эксергия же цемента  $e_{\text{цем}}$  может быть определена в соответствии с методикой, изложенной в [10]. Согласно этой методике цемент рассматривается как своего рода «продукт-энергоноситель», а эксергия цемента есть «комплексная энергетическая характеристика качества порошка цемента, учитывающая его химико-минералогический и дисперсный составы, (...) единый энерготехнологический критерий оптимизации (...), который учитывает все составляющие технологии цемента как единой системы механотермохимического превращения сырья в цемент» [10, с. 58].

Учитывая такую постановку вопроса и принимая в расчёт, что химическая эксергия песка и щебня равна нулю, уравнение (4) следует привести к следующему виду:

$$e_{\text{бс}} = e_{\text{цем}} \cdot g_{\text{цем}} + e_{k, \text{бс}} + e_{pT, \text{бс}}, \text{ кДж/кг}, \quad (6)$$

где  $g_{\text{цем}}$  – массовая доля цемента в бетонной смеси.

Величина эксергии цемента  $e_{\text{цем}}$  является индивидуальной характеристикой каждой его партии и находится в пределах от 7000 до 10000 кДж/кг, достигая в среднем значения  $\approx 8000$  кДж/кг [10].

В процессе соединения цемента и воды протекает реакция гидратации активных компонентов цементного клинкера. Однако в первый час такого взаимодействия гидратации подвергается не более 1% от общего количества цемента [14; 15], что позволяет при вычислении реакционной составляющей эксергии бетонной смеси вынести весь эксергетический эффект имеющих при этом место химических превращений за пределы смесителя, целиком отнеся его на стадию тепловой обработки бетонного изделия. Связанная с этим погрешность значительно меньше погрешности исходных данных и определения химической составляющей эксергии [3].

Концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси  $e_{k, \text{бс}}$  предопределяется минимальной термодинамической работой, которую необходимо произвести для разделения образующих смесь компонентов [6; 9]. Указанная работа требуется для преодоления адгезионного взаимодействия между жидкой средой, образованной системой «вода – цемент», и минеральными инертными заполнителями.

Известно, что бетонные смеси являются многофазными системами, в которых дисперсионной средой служит вода, а дисперсной фазой выступают частицы заполнителя, вяжущего и воздушные включения [15–19]. Возникающие в них на ранних стадиях связи (до начала процессов схватывания) обусловлены главным образом межфазными взаимодействиями и взаимодействиями между отдельными частицами дисперсной фазы. При этом межфазные взаимодействия определяются в основном различными типами адгезионных и сорбционных связей.

Продолжительность перемешивания бетонной смеси задаётся опытным путём и в смесителях циклического действия составляет 60–150 секунд в зависимости от свойств бетонной смеси, объёма готового замеса и типа смесителя. Учитывая кинетику физико-химического взаимодействия компонентов бетонной смеси в смесителе и непродолжительное время перемешивания в нём, а также принимая во внимание ранее сделанный вывод об условной неизменности привнесённой цементом составляющей эксергии 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 твёрдой дисперсной фазы водным раствором продуктов, образующихся в самой начальной стадии превращений цемента. В итоге концентрационная составляющая эксергии готовой бетонной смеси в значительной мере будет определяться минимальной механической работой, необходимой для перемешивания всех её компонентов в смесителе [6; 9].

В силу особенностей химико-физического строения вода удерживается щебнем и песком за счёт адгезионных сил, обусловленных поверхностным натяжением и смачиванием. Природа взаимодействия цемента с водой носит принципиально иной характер, поскольку сразу же после соединения начинает

формироваться коагуляционная структура цементного геля. Сроки схватывания цементных гелей в отсутствие специальных подходов, направленных на их управление, составляют в зависимости от водоцементного соотношения от 2,5 до 13,5 часов, а при максимальном содержании ускорителей твердения соответственно от 10 минут до 4 часов [15–18]. Они многократно превосходят продолжительность пребывания компонентов бетонной смеси в смесительном агрегате.

Таким образом, отмеченные особенности смесеобразования позволяют принять за основу модель, предполагающую, что соединение твёрдых компонентов бетонной смеси с водой в смесителе происходит в результате адгезионного взаимодействия, обусловленного смачиванием твёрдой поверхности компонентов.

Удельная работа адгезионного взаимодействия воды и гладкой поверхности сухого твёрдого материала в системе «поверхность – вода – воздух» определяется на основании уравнения Дюпре – Юнга или его модификаций [20]:

$$W_{ад} = \sigma_{жсз} \cdot (1 + \cos \theta), \text{ Дж/м}^2, \quad (7)$$

где  $\sigma_{жсз}$  – поверхностное натяжение воды, Дж/м<sup>2</sup> (или Н/м);  $\theta$  – краевой угол смачивания воды к поверхности материала.

Следует учесть, что, во-первых, в условиях производства при транспортировке и хранении на поверхности твёрдых компонентов формируется слой воды за счёт адсорбции её паров из атмосферного воздуха и, во-вторых, поверхность материалов отличается шероховатостью. Для гидрофильной шероховатой поверхности краевой угол смачивания всегда меньше, чем для такой же поверхности, но гладкой. Также вода затворения не является химически чистой, содержит растворённые в ней химические вещества, в том числе и те, что поступили в неё в момент смешения с компонентами бетонной смеси. Действие этих факторов приводит к тому, что действительная работа адгезии не может быть определена однозначно и будет отличаться от величины, которая следует из уравнения (7). Поскольку поверхностное натяжение воды в диапазоне рабочих температур в смесителе составляет от  $75 \cdot 10^{-3}$  до  $69 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>, работа адгезионного взаимодействия воды с поверхностями минеральных компонентов бетонной смеси при краевых углах смачивания  $\theta$ , равных  $0^\circ \dots 90^\circ$ , лежит в пределах изменения  $W_{ад} = (69 \cdot 10^{-3} \dots 150 \cdot 10^{-3})$  Дж/м<sup>2</sup>. С учётом того, что твёрдые компоненты бетонной смеси относятся к хорошо смачиваемым материалам, наиболее вероятная величина работы адгезионного взаимодействия в рассматриваемых условиях находится в пределах  $125 \cdot 10^{-3}$  Дж/м<sup>2</sup>, что и примем для последующей оценки структуры эксергии бетонной смеси.

Величина работы адгезионного взаимодействия материалов бетонной смеси в смесителе находится в прямой связи с удельной поверхностью, которая, в свою очередь, зависит от гранулометрических характеристик песка, щебня и цемента. Если известен гранулометрический состав заполнителей, применительно к бетонному производству их удельная поверхность может быть выражена в виде суммы по процентному соотношению соответствующих фракций и их удельной поверхности [16; 17]. Удельная поверхность смеси твёрдых компонентов  $s_{тк}$  определяется вкладом их удельных поверхностей с учётом доли каждого из них в смеси. Доля цемента, песка и щебня в смеси определяется в зависимости от требований, предъявляемых при проектировании состава бетонов.

Например, для бетона общестроительного назначения класса В15 удельная поверхность твёрдых компонентов составляет  $s_{тк} = 47,2 \text{ м}^2/\text{кг}$ .

В соответствии с изложенной методикой и принятыми допущениями концентрационная составляющая эксергии бетонной смеси

$$e_{к,бс} = s_{тк} \cdot W_{ад} = 47,2 \cdot 0,125 = 5,90 \text{ кДж/кг}.$$

Термомеханическая составляющая эксергии потока бетонного раствора определяется соотношением

$$e_{pT,бс} = \sum g_i (\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{бс}} \cdot ((t_{бс} - t_0) - T_0 \cdot \ln(T_{бс} - T_0))), \text{ кДж/кг}, \quad (8)$$

где  $\bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{бс}}$  – удельная массовая изобарная теплоёмкость бетонной смеси, средняя в интервале температур от  $t_0$  до  $t_{бс}$ , кДж/(кг·К);  $T_0$ ,  $T_{бс}$ , К, ( $t_0$ ,  $t_{бс}$ , °С) – соответственно температуры окружающей среды и бетонной смеси.

Применительно к фактическим производственным условиям заводов ЖБИ температура бетонной смеси и температура окружающей среды соотносятся в зависимости от того, каковы температуры воздуха, твёрдых компонентов и воды. При положительных температурах наружного воздуха их можно принять

одинаковыми. При отрицательных температурах наружного воздуха инертные компоненты песок и щебень могут подвергаться разогреву, предотвращающему слипание. В некоторых технологиях подогревается и вода затворения. Интервал возможного изменения температур в этих процессах составляет от 5 до 50 °С.

Удельная массовая изобарная теплоёмкость средняя в интервале температур 5...50 °С определяется известным для смесей соотношением по заданному составу и теплоёмкости компонентов:

$$\bar{c}_p = \sum_{j=1}^n \bar{c}_{p,j} \Big|_{t_0}^{t_{bc}} \cdot g_j, \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}. \quad (9)$$

С учётом состава для бетона общестроительного назначения класса В15 удельная изобарная средняя теплоёмкость  $\bar{c}_p = 1,097$  кДж/кг, термомеханическая составляющая эксергии  $e_{pT,bc} = 5,425$  кДж/кг, а массовая доля цемента  $g_{\text{цем}}$  составляет 0,1266 кг/кг. В итоге эксергия бетонной смеси, покидающей смеситель, составляет:

$$e_{bc} = g_{\text{цем}} \cdot e_{\text{цем}} + e_{pT,bc} + e_{k,bc} = 0,1266 \cdot 8000 + 5,42 + 5,90 = 1024 \text{ кДж/кг}.$$

В полученной величине эксергии бетонной смеси составляющая, привнесённая цементом, значительно (на два порядка) 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.

Найденная величина эксергии потока бетонной смеси представляет собой компоненту эксергетического входа в теплотехнологическую установку, предназначенную для формовки и ускоренной гидратации изделий. При этом основным располагаемым энергетическим ресурсом в ходе технологических преобразований вещества служит эксергия цемента, который в данном случае может рассматриваться как «вещество-энергоноситель». Остальные же эксергетические потоки, подаваемые на вход теплотехнологической установки ускоренного твердения, компенсируют внутреннюю и внешнюю потери эксергии в процессе производства.

В условиях реального производства предельная продолжительность твердения бетонных изделий обусловлена организационно-экономическими ограничениями: оборачиваемостью форм и установок, наличием складских площадей, установленной мощностью технологического оборудования, объёмом выпуска продукции. Если таких ограничений нет, то предпочтение следует отдавать естественному набору прочности изделиями. Следовательно, эксергетические характеристики процесса ТО должны рассматриваться в неразрывной связи с координатой времени.

Для выявления такой связи рассмотрим следующую модель. Пусть в некотором базовом процессе, предполагающем *минимальный внешний подвод энергии* на осуществление ТО, величина располагаемой эксергии на входе в теплотехнологическую установку, обусловленная наличием цемента в бетонной смеси  $E'_{\text{цем}}$ , такова, что по истечении *максимальной* технологической продолжительности этого процесса  $z = z_0$  степень гидратации цемента достигнет заданного значения  $K_0$ , а остаточное значение эксергии цемента на выходе установки составит  $E''_{\text{цем}}$ . Пусть при этом для компенсации внутренних и внешних потерь эксергии к системе подводится минимально необходимый эксергетический поток  $E_0^{\text{ПОДВ}}$ .

Если потребуются технологическую продолжительность процесса уменьшить с  $z_0$  до  $z_1$ , то достижение заданного уровня качества  $K_0$  станет возможным лишь при увеличении величины подводимого к изделию потока эксергии  $E_0^{\text{ПОДВ}}$  на дополнительный поток  $\Delta E_1^{\text{ПОДВ}}$ . Всякое сокращение наперёд заданной технологической продолжительности обработки  $z_i$  неизбежно ведёт к необходимости увеличивать значение  $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$ . В итоге потребная при этих условиях величина эксергетического входа системы  $E'_i$  увеличится по сравнению с  $E_0^{\text{ПОДВ}}$  на  $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$  в соответствии с выбранной технологической продолжительностью процесса  $z_i$ :

$$E'_i = E'_{\text{цем}} + \Delta E_0^{\text{ПОДВ}} + \Delta E_i^{\text{ПОДВ}}, \text{ кДж}. \quad (10)$$

При этом справедливы соотношения:

$$\begin{cases} E'_{i+1} > E'_i > E'_{i-1}; \\ z_{i+1} < z_i < z_{i-1}. \end{cases}$$

Потоки эксергии  $E_0^{\text{ПОДВ}}$  и  $\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}$  являются комплексными величинами, состав которых зависит от используемых методов энергетического воздействия на технологический процесс с целью интенсификации производства в соответствии с заданными параметрами времени и качества изготовления изделий:

$$E_0^{\text{ПОДВ}} = E_{\text{мех}}^{\text{ин}} + E_Q^{\text{ин}} + E_{\text{хим}}^{\text{ин}}, \text{ кДж}; \quad (11)$$

$$\Delta E_i^{\text{ПОДВ}} = \Delta E_{i,\text{мех}}^{\text{ин}} + \Delta E_{i,Q}^{\text{ин}} + \Delta E_{i,\text{хим}}^{\text{ин}}, \text{ кДж}, \quad (12)$$

где  $\Delta E_{i,\text{мех}}^{\text{ин}}, \Delta E_{i,Q}^{\text{ин}}, \Delta E_{i,\text{хим}}^{\text{ин}}$  – соответственно дополнительно подведённые потоки эксергии за счёт механического, теплового и химического воздействия на параметры реализуемого технологического процесса, кДж.

Сокращение продолжительности технологического цикла  $z$  ведёт к росту коэффициента загрузки теплотехнологического оборудования, увеличению объёма производства и, следовательно, к более рациональному использованию энергетических ресурсов. Таким образом, прослеживается обобщённая связь между объёмом производства, продолжительностью технологического цикла и дополнительным эксергетическим потоком, который необходимо подать на вход ТТУ для ускоренного твердения бетона, чтобы в заданные сроки обеспечить достижение продукцией необходимых качественных характеристик.

С учётом изложенного для оценки термодинамической эффективности различных режимов и способов интенсификации процессов ТО бетонных изделий при заданной её продолжительности  $z = z_i$  предлагается ввести следующий безразмерный численный критерий эксергетической эффективности режима тепловой обработки бетонных изделий:

$$\bar{K}(z) = \frac{E_0^{\text{ПОДВ}} + \Delta E_i^{\text{ПОДВ}}}{E_0^{\text{ПОДВ}}} = 1 + \frac{\Delta E_i^{\text{ПОДВ}}}{E_0^{\text{ПОДВ}}}. \quad (13)$$

Физический смысл критерия  $\bar{K}(z)$  состоит в установлении «энергетической цены», которую необходимо будет уплатить за сокращение времени ТО с целью увеличения объёма производства по сравнению, например, с вариантом естественного твердения. Сокращение продолжительности технологического процесса с  $z_0$  до  $z_i$  ведёт к увеличению потока подводимой к теплотехнологической установке эксергии на нужды ТО в  $\bar{K}(z)$  раз. При этом объём выпуска изделий возрастает в  $\bar{K}_N \approx z_0 / z_i$  раз.

Решение о сокращении времени ТО для увеличения выпуска продукции с энергетической точки зрения будет считаться эффективным при выполнении следующего условия:

$$\bar{K}_N \geq \bar{K}(z). \quad (14)$$

Уравнения (13) и (14), таким образом, позволяют выполнять проверку энергоэффективности принимаемых технологических и организационно-экономических решений при планировании производственной деятельности.

Следует отметить, что в уравнениях (11) и (12)  $E_{i,\text{мех}}^{\text{ПОДВ}}$  тождественна механической работе, которую необходимо произвести для уплотнения бетонной смеси;  $E_{i,\text{хим}}^{\text{ПОДВ}}$  обусловлена увеличением активности цемента или его доли в смеси, а  $E_{i,\text{тепл}}^{\text{ПОДВ}}$  численно равна теплоте, которую необходимо подвести извне в теплотехнологическую установку к бетонному телу для осуществления ТВО в заданное время. Определение первой составляющей лежит вне задач промышленной теплоэнергетики; её нахождение подробно рассматривается в работах, посвящённых технологии бетона [16; 21]. Что касается эксергии бетонной смеси, то её величина может быть определена на основании уравнений (4)–(9), полученных в настоящем исследовании.

Потребное количество теплоты, которое необходимо подвести извне к бетонному изделию с целью достижения бетоном назначенной прочности в заданное время, может быть определено в соответствии с методикой расчёта энергетических характеристик процесса ТО бетонных изделий в теплотехнологических установках, разработанной авторами (при участии А.Н. Чичко и Ю.В. Яцкевича) и опубликованной в работах [21–26].

#### Заключение и выводы

1. Разработан баланс эксергетических потоков применительно к процессам ТО бетонного изделия в теплотехнологической установке для проведения ускоренной гидратации.

2. Определена структура эксергии бетонной смеси. Предложена методика расчёта концентрационной, реакционной, термомеханической составляющих эксергии бетонной смеси, учитывающая гранулометрический состав инертных компонентов, активность цемента, условия протекания процессов смеси-

образования. Показано, что для общестроительного бетона марки В15 эксергия смеси перед стадией формовки составляет 1024 кДж/кг, причём величина эксергии решающим образом определяется эксергией цемента, что позволяет ограничиться достигнутой при разработке методики точностью в определении концентрационной и термомеханической составляющих эксергии.

3. Разработана система критериев энергетической эффективности организации процесса ТО бетонных изделий в ТТУ, позволяющая производить оценку степени энергетического и термодинамического совершенства технической системы для проведения ТО и выбор рациональной продолжительности процесса ТО при планировании объёма выпуска продукции с учётом требований энергоэффективности.

Практическая ценность полученных результатов состоит в возможности их использования при разработке энергоэффективных режимов и способов интенсификации ТО бетонных изделий в теплотехнологических устройствах для осуществления ускоренной гидратации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ключников, А.Д. Интенсивное энергосбережение: предпосылки, методы, следствия / А.Д. Ключников // Теплоэнергетика. – 2000. – № 11. – С. 12–16.
2. Ключников, А.Д. Предпосылки радикального повышения эффективности работ в области энергосбережения / А.Д. Ключников // Промышленная энергетика. – 2001. – № 4. – С. 12–17.
3. Бродянский, В.М. Эксергетический метод и его приложения / В.М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек ; под ред. В.М. Бродянского. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
4. Сазанов, Б.В. Теплоэнергетические системы промышленных предприятий / Б.В. Сазанов, В.И. Ситас. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 304 с.
5. Системы производства и распределения энергоносителей промышленных предприятий : учебник / Б.М. Хрусталева [и др.]. – Минск : Технопринт, 2005. – Ч. 1. – 544 с.
6. Романюк, В.Н. Интенсивное энергосбережение в теплотехнологических системах промышленного производства строительных материалов : дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.04 / В.Н. Романюк ; БНТУ. – Минск, 2010. – 365 л.
7. Романюк, В.Н. Энерготехнология производства асфальтобетонных смесей / В.Н. Романюк // Вестн. БНТУ. – 2003. – № 4. – С. 53–55.
8. Kots, I. Exergy analysis of thermal processes technology manufacture of building products / I. Kots, O. Kolesnik // Modern technologies, materials and design in construction. – Vinnica : Vinnitsia National Technical University, 2011. – № 1 (10). – P. 46–48.
9. Koroneos, C. Exergy analysis of cement production / C. Koroneos, G. Roumbas, N. Moussiopoulos // Int. J. Exergy. – 2005. – Vol. 2. – No. 1. – P. 55–68.
10. Эксергетический анализ процессов химической технологии (на примере технологии цемента) / М.А. Вердиян [и др.]. – М. : РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2004. – 68 с.
11. Муслина, Д.Б. Научно-методическое обеспечение модернизации теплоэнергетических систем текстильных и трикотажных предприятий лёгкой промышленности : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Д.Б. Муслина ; БНТУ. – Минск, 2016. – 197 л.
12. Бобич, Д.Б. Комплекс энергосберегающих мероприятий на ТЭЦ при адаптации к условиям работы энергосистемы с вводом Белорусской АЭС : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / А.А. Бобич ; БНТУ. – Минск, 2018. – 224 л.
13. Степанов, В.С. Химическая энергия и эксергия веществ / В.С. Степанов. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1990. – 163 с.
14. Нормантович, А.С. Регулирование процесса водоотделения цементно-водных дисперсных систем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.11 / А.С. Нормантович. – Белгород, 2005. – 20 с.
15. Химия строительных материалов : учебник / Й. Планк [и др.]. – Шымкент : Южно-Казахстанский гос. ун-т им. М. Ауэзова, 2016. – 221 с.
16. Ахвердов, И.Н. Основы физики бетона / И.Н. Ахвердов. – М. : Стройиздат, 1981. – 464 с.
17. Баженов, Ю.М. Технология бетона : учебник / Ю.М. Баженов. – М. : Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.
18. Райхель, В. Бетон : в 2-х ч. ; пер. с нем. ; под ред. В.Б. Ратинова – М. : Стройиздат, 1979. – Ч. 1 : Свойства. Проектирование. Испытания. – 111 с.
19. Фридрихсберг, Д.А. Курс коллоидной химии : учеб. для вузов / Д.А. Фридрихсберг. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1984. – 368 с.
20. Зимон, А.Д. Адгезия жидкости и смачивания / А.Д. Зимон – М. : Химия, 1974. – 416 с.
21. Маслов, А.Г. Теоретические основы вибрационного уплотнения цементобетонных смесей / А.Г. Маслов, А.Ф. Иткин // Вісник Кременчуцького держ. політехн. університету. – Кременчук : КДПУ, 2004. – Вип. 5/2004 (28). – С. 45–49.



22. Численное моделирование эволюции энергетических характеристик процесса тепловой обработки композитного бетонного изделия / А.М. Нияковский [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Строительство. – 2019. – № 3 (723). – С. 86–100.
23. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования для производства бетонных изделий на основе численного моделирования нестационарных процессов / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 2. – С. 177–191.
24. Дискретная оптимизация программно-управляемых режимов тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергет. объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 280–292.
25. Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А.М. Нияковский [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энергетических объединений СНГ. – 2019. – Т. 62, № 4. – С. 307–324.
26. Нияковский, А.М. Алгоритм и численная схема моделирования нестационарных процессов тепловой обработки бетонных изделий / А.М. Нияковский, Ю.В. Яцкевич, А.Н. Чичко // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия С, Фундаментальные науки. – 2019. – № 4. – С. 50–61.

Поступила 23.06.2019

#### DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND METHODOLOGICAL BASES OF EXERGETIC ANALYSIS OF THE PROCESS OF HEAT TREATMENT OF CONCRETE PRODUCTS IN HEAT-TECHNOLOGICAL INSTALLATIONS

A. NIYAKOVSKI, V. ROMANIUK

*In the process of development and selection of energy-efficient methods of heat treatment of concrete products in heat-technological installations there is a need for the objective criteria that allow to rank the processing modes according to the criterion of energy consumption efficiency. The article proposes the usage of the exergy analysis methodology for this purpose. As a result of the research, the equations for calculating the exergy of the concrete mixture entering the thermal technological installation of accelerated hydration are obtained. It is shown that the value of the exergy of the concrete mixture is largely determined by the exergy of the cement. The interdependence between the exergy of the concrete mixture, additional exergy flows designed to accelerate the hydration process and the duration of the process cycle is shown. A numerical thermodynamic criterion for ranking the modes of heat treatment of concrete by the amount of energy consumption is proposed.*

**Keywords:** heat power systems, energy saving, heat technologies, thermodynamic analysis, exergy, manufacturing of concrete products, installation for accelerated hydration of concrete.