

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

ИЗВЕСТИЯ ВЫСШИХ УЧЕБНЫХ ЗАВЕДЕНИЙ
И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕДИНЕНИЙ СНГ

ЭНЕРГЕТИКА

Том 62, № 4
2019

МЕЖДУНАРОДНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
ИЗДАЕТСЯ С ЯНВАРЯ 1958 ГОДА

Учредитель

Министерство образования Республики Беларусь

Журнал включен в базы данных:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ,
ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Нияковский А. М., Романюк В. Н., Чичко А. Н., Яцкевич Ю. В.** Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий 307
- Осипов С. Н., Захаренко А. В., Широкова Е. М.** Об энергоэффективности кондиционирования воздуха в помещении 325
- Кашин Е. М., Диденко В. Н.** Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации 341

ЭКОНОМИКА ЭНЕРГЕТИКИ

- Манцорова Т. Ф., Лапченко Д. А.** Основные подходы к экономической диагностике предприятий энергетики 362
- Бугаева Т. М., Новикова О. В.** Современные методы планирования энергосистемы города 377
- Корсак Е. П.** Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь 388

Главный редактор Федор Алексеевич Романок

Редакционная коллегия

- В. ВУЙЦИК (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
В. В. ГАЛАКТИОНОВ (Русский институт управления имени В. П. Чернова, Москва, Российская Федерация),
М. ДАДО (Зволенский технический университет, Зволен, Словацкая Республика),
В. А. ДЖАНГИРОВ (Комитет ТПП РФ по энергетической стратегии и развитию ТЭК, Москва, Российская Федерация),
К. В. ДОБРЕГО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
И. В. ЖЕЖЕЛЕНКО (Приазовский государственный технический университет, Мариуполь, Украина),
П. В. ЖУКОВСКИ (Технический университет «Люблинская политехника», Люблин, Республика Польша),
А. С. КАЛИНИЧЕНКО (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (первый заместитель главного редактора),
А. И. КИРИЛЛОВ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация),
А. КОННОВ (Университет Лунда, Швеция),
Б. К. МАКСИМОВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
Х. МАХКАМОВ (Университет Нортумбрии, Великобритания),
А. А. МИХАЛЕВИЧ (Национальная академия наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. С. МИШУК (Исполнительный комитет Энергетического совета Содружества Независимых Государств, Москва, Российская Федерация),
НГО ТУАН КИЕТ (Научный энергетический институт Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Социалистическая Республика Вьетнам),
О. Г. ПЕНЯЗЬКОВ (Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси, Минск, Республика Беларусь),
Е. Н. ПИСЬМЕННЫЙ (Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», Киев, Украина),
Э. Н. САБУРОВ (Северный (Арктический) федеральный университет имени М. В. Ломоносова, Архангельск, Российская Федерация),
А.-С. С. САУХАТАС (Рижский технический университет, Рига, Латвийская Республика),
В. С. СЕВЕРЯНИН (Брестский государственный технический университет, Брест, Республика Беларусь),
И. И. СЕРГЕЙ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь) (заместитель главного редактора),
Б. С. СОРОКА (Институт газа НАН Украины, Киев, Украина),
В. А. СТРОЕВ (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Российская Федерация),
В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ (ООО, Киев, Украина),
Е. В. ТОРОПОВ (Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Российская Федерация),
Е. УШПУРАС (Литовский энергетический институт, Каунас, Литовская Республика),
Б. М. ХРУСТАЛЕВ (Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь),
Л. В. ШЕНЕЦ (Евразийская экономическая комиссия, Москва, Российская Федерация)*

Ответственный секретарь редакции В. Н. Гурьянчик

Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 28 февраля 2019 г.
Регистрационный номер 1257

Набор и верстка выполнены в редакции журналов «Энергетика» и «Наука и техника»

Подписано к печати 31.07.2019. Формат бумаги 60×84¹/₈. Бумага мелованная.
Печать цифровая. Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 12,0. Уч.-изд. л. . Тираж 100 экз.
Дата выхода в свет . 2019. Заказ .

Адрес редакции: 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65. Белорусский национальный технический университет, корп. 2, комн. 327. Телефон +375 17 292-65-14.
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Отпечатано в БНТУ. Лицензия ЛП № 02330/74 от 03.03.2014.
220013, г. Минск, пр. Независимости, 65

© Белорусский национальный технический университет, 2019

ISSN 1029-7448 (Print)
ISSN 2414-0341 (Online)

PROCEEDINGS OF THE CIS
HIGHER EDUCATION INSTITUTIONS
AND POWER ENGINEERING ASSOCIATIONS

ENERGETIKA

V. 62, No 4
2019

INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL
PUBLISHED FROM JANUARY, 1958

Founder

Ministry of Education of the Republic of Belarus

The Journal is included in the following databases:
Scopus, EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC,
Lan, CyberLeninka, Socionet

CONTENTS

HEAT POWER ENGINEERING

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	307
Osipov S. N., Zakharenko A. V., Shirokova E. M. On the Energy Efficiency of Indoor Air Conditioning	325
Kashin E. M., Didenko V. N. The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process	341

POWER ENGINEERING ECONOMICS

Mantserova T. F., Lapchenko D. A. The Main Approaches to Economic Diagnostics of the Power Engineering Enterprises	362
Bugaeva T. M., Novikova O. V. Modern Methods of Urban Energy System Planning	377
Korsak E. P. Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus	388

Editor-in-Chief Fiodar A. Romaniuk

Editorial Board

- W. T. WÓJCIK (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),*
V. V. GALAKTIONOV (Russian Institute of Management named after V. P. Chernov, Moscow, Russian Federation),
M. DADO (Technical University in Zvolen, Zvolen, Slovak Republic),
V. A. JANGIROV (RF CCI Committee on Energy Strategy and the Development of Fuel-Energy Complex, Moscow, Russian Federation),
K. V. DOBREGO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
I. V. ZHEZHELENKO (Pryazovskyi State Technical University, Mariupol, Ukraine),
P. W. ZHUKOWSKI (Lublin University of Technology “Politechnika Lubelska”, Lublin, Republic of Poland),
A. S. KALINICHENKO (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (First Deputy Editor-in-Chief),
A. I. KIRILLOV (Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, Saint-Petersburg, Russian Federation),
A. KONNOV (Lund University, Sweden),
B. K. MAKSIMOV (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),
K. MAHKAMOV (Northumbria University, United Kingdom),
A. A. MIKHALEVICH (The National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. S. MISHUK (The Executive Committee of the Energy Council of the Commonwealth of Independent States, Moscow, Russian Federation),
NGO TUAN KIET (Research Energy Institute under the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Socialist Republic of Vietnam),
O. G. PENYAZKOV (A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus),
E. N. PISMENNYI (National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kiev, Ukraine),
E. N. SABUROV (Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov, Arkhangelsk, Russian Federation),
A.-S. S. SAUHATAS (Riga Technical University, Riga, Republic of Latvia),
V. S. SEVERYANIN (Brest State Technical University, Brest, Republic of Belarus),
I. I. SERGEY (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus) (Deputy Editor-in-Chief),
B. S. SOROKA (The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine),
V. A. STROEV (National Research University “Moscow Power Engineering Institute”, Moscow, Russian Federation),
V. I. TIMOSHPOLSKY (LLC, Kiev, Ukraine),
E. V. TOROPOV (South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation),
E. UŠPURAS (Lithuanian Energy Institute, Kaunas, Republic of Lithuania),
B. M. KHROUSTALEV (Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus),
L. V. SHENETS (The Eurasian Economic Commission, Moscow, Russian Federation)

Executive Secretary of Editorial Board V. N. Guryanchyk

**Publication is registered in the Ministry of Information of the Republic of Belarus in 2019, February, 28th
Reg. No 1257**

Typesetting and makeup are made in editorial office
of Journals “Energetika” and “Science and Technique”

Passed for printing 31.07.2019. Dimension of paper 60×84¹/₈. Coated paper.
Digital printing. Type face Times. Conventional printed sheet 12,0.
An edition of 100 copies. Date of publishing 2019. Order list .

ADDRESS

Belarusian National Technical University
65 Nezavisimosty Ave., Building 2, Room 327
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-65-14
e-mail: energy@bntu.by; energy-bntu@mail.ru
<http://energy.bntu.by>

Printed in BNTU. License LP No 02330/74 from 03.03.2014.
220013, Minsk, 65 Nezavisimosty Ave.

© Belarusian National Technical University, 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324>

УДК 66.040.25:519.6:666.97.035.5

Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий

А. М. Нияковский¹⁾, В. Н. Романюк²⁾, А. Н. Чичко²⁾, Ю. В. Яцкевич²⁾

¹⁾Полоцкий государственный университет (Новополоцк, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Разработка методов расчета динамики изменения тепловых энергетических характеристик процесса ускоренной гидратации является одной из сложнейших задач теплоэнергетики. В статье рассмотрен новый метод расчета теплотехнических характеристик процесса, ориентированный на применение его в установках ускоренной гидратации, применяемых в производстве 3D-бетонных конструкций. При разработке метода использованы принципы клеточно-автоматного моделирования энергетических характеристик процесса тепловой обработки бетонов. Математический аппарат метода основан на конечно-разностном трехмерном уравнении теплопроводности, позволяющем учесть: пространственные размеры изделия из бетона, пространственное расположение опалубки, пространственное распределение нагревательных элементов и другие конструктивные особенности системы ускоренной гидратации за счет системы граничных и начальных условий. Входными параметрами используемых моделей являются плотности, теплопроводности, теплоемкости бетонной смеси и конструктивных элементов, входящих в технологическую оснастку изделия. Граничные и начальные условия позволят решать задачи моделирования для любой 3D-конструкции. Цель исследований – разработка метода расчета динамики изменения энергетических характеристик твердеющего 3D-изделия из бетона, подвергнутого тепловой обработке, на основе сеточной неравновесной теплофизической модели. Представлен формульный аппарат, позволяющий связать геометрические характеристики изделия и конечно-разностные уравнения теплопроводности с учетом источников тепловыделений. Предложен численный метод определения энергетических характеристик твердеющего 3D-изделия из бетона, подвергнутого тепловой обработке, заключающийся в вычислении в зависимости от времени тепловой обработки: теплоты, подведенной к изделию извне; теплоты, рассеянной в окружающую среду; выделившейся теплоты гидратации; аккумулярованной в изделии теплоты с учетом геометрии изделия. Метод построен на основе сеточной трехмерной теплофизической модели, учитывающей неравновесность и систему граничных условий, отражающих специфику процесса в установках ускоренной гидратации бетонов. Выполнены расчеты функций энергетических характеристик, определяющих тепловую обработку, в зависимости от времени тепловой обработки для кубических

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

3D-изделий из бетона различного размера. Показано, что скорость изменения энергетических характеристик можно моделировать для изделий любой пространственной конфигурации.

Ключевые слова: энергосбережение, теплотехнологии, математическое моделирование, температурное поле, нестационарное уравнение теплопроводности, численные методы исследований, ускоренная гидратация бетона

Для цитирования: Метод расчета эволюции теплоэнергетических характеристик процесса ускоренной гидратации бетонных изделий / А. М. Нияковский [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>

The Method of Calculation of the Evolution of Thermal and Energy Characteristics of the Accelerated Hydration Process of Concrete Products

A. M. Niyakovskii¹, V. N. Romaniuk², A. N. Chichko², Yu. V. Yatskevich²

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

²Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The development of methods for calculating the dynamics of the energy thermal characteristics of the accelerated hydration process is one of the most difficult tasks of heat power engineering. The article describes a new method of calculating the thermal characteristics of the process, focused on its application in the installations of accelerated hydration used for the production of 3D-reinforced concrete structures. The principles of cellular-automatic modeling of energy characteristics of concrete heat treatment process were used in the development of the method. The mathematical apparatus used in the method is based on the finite-difference three-dimensional heat equation, which allows taking into account, due to the system of boundary and initial conditions, the spatial dimensions of the concrete product, the spatial arrangement of the formwork, the spatial distribution of heating elements and other design features of the accelerated hydration system. The input parameters of the models used are the density, thermal conductivity, heat capacity of the concrete mixture and structural elements included in the tooling of the product. Boundary and initial conditions will make it possible to solve modeling problems for any 3D-design. The goal of the study is to develop a method for calculating the energy characteristics dynamics of the hardening of 3D-concrete products subjected to heat treatment, based on a grid non-equilibrium thermal model. The paper presents a mathematical equation apparatus that allows linking the geometric characteristics of the product and the finite-difference equations of thermal conductivity, including sources of heat. A numerical method for determining the energy characteristics of the hardening of 3D-concrete products subjected to heat treatment has been proposed consisting of, depending on the time of heat treatment, the calculation of the outside heat supplied to the concrete product, heat dissipated into the environment, the emitted heat of hydration and the heat accumulated in the concrete product during heat treatment, taking into account the geometry of the product. The method is based on a grid three-dimensional thermophysical model that takes into account the nonequilibrium and the system of boundary conditions that reflect the specifics of the process in the accelerated hydration of concrete. Calculations of the functions of the energy characteristics determining the heat treatment, depending on the time of heat treatment for cubic 3D-concrete products of different sizes have been performed. It is demonstrated that the rate of alteration of energy characteristics can be modeled for products of any spatial configuration.

Keywords: energy saving, heat technologies, mathematical modeling, temperature field, non-stationary equation of heat conductivity, numerical methods of research, accelerated hydration of concrete

For citation: 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. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 307–324. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-307-324> (in Russian)

Введение

Разработка методов моделирования энергетических характеристик процесса тепловой обработки бетонных изделий в теплотехнологических установках ускоренной гидратации является одной из сложнейших задач, имеющих важное как теоретическое, так и практическое значение для оптимизации теплоэнергетических схем промышленных предприятий (ТЭСПП), осуществляющих производство бетонных и железобетонных изделий и конструкций [1–3]. Практический интерес к разработке методов моделирования энергетических параметров технологий, применяемых при изготовлении бетонных изделий, связан с тем, что использование таких методов позволяет оценить энергопотребление внедряемой на предприятии технологии еще на стадии разработки, ранжируя ее по энергетическим характеристикам и проводя дискретную оптимизацию энергосберегающих режимов. Несмотря на то что многие уравнения, с помощью которых можно рассчитать энергетику процесса гидратации, известны, существует ряд математических трудностей на пути решения общей системы уравнений, описывающих процесс твердения бетона [4–8]. Это заставляет исследователей упрощать постановку задачи, сводя ее зачастую к одно- или двумерным приближениям.

Литературный анализ показывает, что значительная часть научных работ не учитывает особенности реальной пространственной 3D-геометрии изделий (распределение материала в их пространстве). В то же время существует множество эмпирических подходов, ориентированных на математические модели с сосредоточенными параметрами [9–11]. Это не позволяет учесть как особенности геометрии подвергаемых тепловой обработке бетонных изделий, так и ряд конструктивных особенностей теплотехнологического оборудования для осуществления ускоренной гидратации.

Следует отметить, что в последние годы в различных областях технических наук определенное развитие получило направление, связанное с разработкой и применением так называемых САЕ-систем (англ. Computer-Aided Engineering) для инженерного анализа и решения различных задач. Их использование позволяет учесть особенности 3D-геометрии исследуемых объектов. Однако, несмотря на их применение, все еще актуальной остается задача разработки математических моделей и специального программного обеспечения под конкретные процессы и конкретные установки, в частности, связанные с тепловой обработкой бетонных изделий в теплотехнических установках ускоренной гидратации.

Настоящая работа направлена на развитие численных методов расчета энергетических характеристик процесса гидратации бетона при его ускоренной тепловой обработке, основанных на конечно-разностном трехмерном уравнении теплопроводности, позволяющем учесть размеры изделия из бетона и его геометрию, пространственное расположение опалубки, пространственное распределение нагревательных элементов и другие особенности технологии получения изделия, учитываемые выбранной системой граничных условий. Такая постановка задачи дает возможность

принять во внимание многие параметры реальных процессов тепловой обработки и особенно актуальна для несимметричных объектов. В результате одно- и двумерные модели [12–14] должны уступить место трехмерным, которые не имеют ограничений, обусловленных пространственными особенностями промышленно изготавливаемых бетонных изделий.

Цель – создание метода расчета эволюции (динамики изменения во времени) энергетических характеристик твердеющего 3D-изделия из бетона, подвергнутого тепловой обработке, на основе сеточной неравновесной теплофизической модели. Данная статья – это продолжение и развитие исследований [15–18], направленных на разработку новых методов изучения теплоэнергетического и теплотехнологического оборудования, тепловых режимов их функционирования на основе сформулированной теплофизической модели и математического аппарата. Полученные результаты позволили заложить основы первой версии белорусской специализированной ИТ-системы для автоматизированного моделирования процесса гидратации бетонных изделий САЕ «ПроЭнергоБетон-1» (ПРОцессы ЭНЕРГОсбережения БЕТОНа), написанную на языке C++. С помощью программы можно рассчитывать и визуализировать во времени тепловой обработки пространственное распределение температуры и степени гидратации в бетонном изделии заданной трехмерной формы с учетом его внутренней структуры, граничных и начальных условий, обусловленных видом и конструктивными особенностями теплотехнологического оборудования для ускоренной гидратации.

Исходные данные и сеточная модель

В качестве объекта исследования использовали трехмерные кубические изделия следующих размеров: 0,1×0,1×0,1 м (объект № 1); 0,2×0,2×0,2 м (№ 2); 0,3×0,3×0,3 м (№ 3); 0,4×0,4×0,4 м (№ 4), поверхности которых были окружены конструкцией в виде опалубки, задававшей систему граничных условий для численного решения задачи теплопереноса в бетонном изделии. С использованием графического редактора САЕ «ПроЭнергоБетон-1» построены четыре сеточные 3D-модели на основе базового кубического сеточного элемента размером 0,005 м (шаг пространства) при шаге моделирования по времени 0,25 с. Расчетная сеточная область включала: пространство твердеющего бетона $\Omega_1(x, y, z)$, контур опалубки $\Omega_2(x, y, z)$, контур греющей среды $\Omega_3(x, y, z)$, пространство нагревателя $\Omega_4(x, y, z)$. Каждая из перечисленных областей имела множество сеточных элементов с координатами x, y, z и характеризовалась теплопроводностью, плотностью и удельной теплоемкостью каждого элемента геометрической конструкции.

Совокупности сеточных элементов систем «бетон – опалубка», «опалубка – внешняя тепловая среда» были математически связаны через граничные условия, описанные ниже.

Граничные условия математической модели на поверхности раздела «бетон – среда тепловой обработки» (Ω_1 – Ω_3) задавались как:

$$-\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} =$$

$$= \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_3} - T_{env}(\tau) \right), \quad (1)$$

где ∂i – это либо ∂x , либо ∂y , либо ∂z согласно пространственной ориентации границы; α – коэффициент теплоотдачи, соответствующий конвективному теплообмену в воздушной среде, принято $\alpha = 20$ Вт/(м²·К).

Граничные условия на поверхности раздела «опалубка – среда тепловой обработки» (Ω_2 – Ω_3) были заданы как:

$$-\lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial x} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} = \alpha \left(T(x, y, z, \tau) \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_3} - T_{env}(\tau) \right). \quad (2)$$

Граничные условия на поверхности раздела «опалубка – бетон» (Ω_2 – Ω_1)

$$\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_1 \cap \Omega_2} = \lambda_{st} \frac{\partial T(x, y, z, \tau)}{\partial i} \Big|_{(x, y, z) \in \Omega_2 \cap \Omega_1}, \quad (3)$$

где τ – время, с; x, y, z – декартовы координаты, м (ось y направлена вертикально); $T(x, y, z, \tau)$, $H(x, y, z, \tau)$ – температура (°С) и степень гидратации бетона в точке с координатами (x, y, z) в момент времени τ ; $\lambda_b(H, T)$ – теплопроводность бетона, зависящая от степени его гидратации и температуры, Вт/(м·К); λ_{st} – теплопроводность стальной опалубки, Вт/(м·К).

В расчетах использовались математическая модель, включающая вышеприведенные граничные условия, а также дифференциальное уравнение теплопроводности в трехмерной постановке с источником тепловыделения, имитирующим процесс гидратации бетонной смеси, и уравнение для расчета процесса гидратации. В качестве параметров этой модели, подробно описанной в [15, 16], принимали: ρ_b – плотность бетона, кг/м³; Π – удельный расход цемента на затворение бетонной смеси, кг/м³; c_b – удельная теплоемкость бетона, Дж/(кг·К); $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) на момент времени τ ; $H(x, y, z, \tau) = Q(x, y, z, \tau)/Q_{max}$ – степень (коэффициент) гидратации цемента; Q_{max} – удельная теплота полной гидратации цемента, Дж/кг.

Расчет изменения температуры в различных точках пространства (Ω_2) производился согласно уравнению теплопроводности с использованием следующих значений входящих в него теплофизических величин: удельная теплоемкость стали $c_{st} = 475$ Дж/кг; плотность стали $\rho_{st} = 7850$ кг/м³; теплопроводность стали $\lambda_{st} = 44,5$ Вт/(м·К).

Для получения конкретного численного результата принимали начальные условия:

$$\begin{cases} T(x, y, z, 0) = 20 \text{ }^\circ\text{C} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3; \\ Q(x, y, z, 0) = 0 \text{ Дж/кг} & \text{для } (x, y, z) \in \Omega_1. \end{cases} \quad (4)$$

Для всех изделий в расчетах использована интервальная функция, имитирующая работу нагревателя, характеризующая температурный режим тепловой обработки вида «нагрев – изотермическая выдержка – охлаждение» и описанная в [15]. Состав бетона соответствовал соотношению компонентов Ц:П:Щ = 1:1,76:2,98 по массе, В/Ц = 0,4, где Ц, П, Щ, В – удельные расходы составляющих бетон материалов (цемента, песка, щебня, воды), кг/м³. Коэффициент теплопроводности бетона $\lambda(H, T)$ с учетом степени (коэффициента) гидратации и температуры, водоцементного отношения, влажности и плотности бетона задавался табулированной функцией [15], разработанной авторами статьи на основании данных, опубликованных в [8, 19].

Теплофизическая модель на основе конечно-разностных отношений была реализована в программе «ПроЭнергоБетон-1». Для расчета температуры в произвольных элементах пространства твердеющего бетона (Ω_1) использовалась формула

$$T(x, y, z, \tau + \Delta\tau) = T(x, y, z, \tau) + \frac{\Delta\tau}{c_b \rho_b} \left(\frac{\Psi_{+\Delta x} - \Psi_{-\Delta x}}{\Delta x} + \frac{\Psi_{+\Delta y} - \Psi_{-\Delta y}}{\Delta y} + \frac{\Psi_{+\Delta z} - \Psi_{-\Delta z}}{\Delta z} + \rho_c P_c(Q(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) \right), \quad (5)$$

где

$$\Psi_{+\Delta x} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x + \Delta x, y, z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x + \Delta x, y, z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x + \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\Delta x} \Big|_{(x + \Delta x, y, z, \tau) \in \Omega_1} \\ \frac{T(x + \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\left(\frac{1}{\lambda_b} (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + \frac{1}{\lambda_{st}} \right) \Delta x / 2} \Big|_{(x + \Delta x, y, z, \tau) \in \Omega_2}; \end{cases}$$

$$\Psi_{-\Delta x} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x - \Delta x, y, z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x - \Delta x, y, z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x - \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\Delta x} \Big|_{(x - \Delta x, y, z, \tau) \in \Omega_1} \\ \frac{T(x - \Delta x, y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\left(\frac{1}{\lambda_b} (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + \frac{1}{\lambda_{st}} \right) \Delta x / 2} \Big|_{(x - \Delta x, y, z, \tau) \in \Omega_2}; \end{cases}$$

$$\Psi_{+\Delta y} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x, y + \Delta y, z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x, y + \Delta y, z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x, y + \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\Delta y} \Big|_{(x, y + \Delta y, z, \tau) \in \Omega_1} \\ \alpha_{up} (T_{env}(\tau) - T(x, y, z, \tau)) \Big|_{(x, y + \Delta y, z, \tau) \in \Omega_3}; \end{cases}$$

$$\Psi_{-\Delta y} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x, y - \Delta y, z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x, y - \Delta y, z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x, y, z, \tau) - T(x, y - \Delta y, z, \tau)}{\Delta y} \Big|_{(x, y - \Delta y, z, \tau) \in \Omega_1} \\ \frac{T(x, y, z, \tau) - T(x, y - \Delta y, z, \tau)}{\left(\frac{1}{\lambda_b} (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + 1/\lambda_{st} \right) \Delta y / 2} \Big|_{(x, y - \Delta y, z, \tau) \in \Omega_2} \end{cases} ;$$

$$\Psi_{+\Delta z} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x, y, z + \Delta z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x, y, z + \Delta z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x, y, z + \Delta z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\Delta z} \Big|_{(x, y, z + \Delta z, \tau) \in \Omega_1} \\ \frac{T(x, y, z + \Delta z, \tau) - T(x, y, z, \tau)}{\left(\frac{1}{\lambda_b} (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + 1/\lambda_{st} \right) \Delta z / 2} \Big|_{(x, y, z + \Delta z, \tau) \in \Omega_2} \end{cases} ;$$

$$\Psi_{-\Delta z} = \begin{cases} \lambda_b \left(\frac{H(x, y, z - \Delta z, \tau) + H(x, y, z, \tau)}{2}, \frac{T(x, y, z - \Delta z, \tau) + T(x, y, z, \tau)}{2} \right) \times \\ \times \frac{T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z - \Delta z, \tau)}{\Delta z} \Big|_{(x, y, z - \Delta z, \tau) \in \Omega_1} \\ \frac{T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z - \Delta z, \tau)}{\left(\frac{1}{\lambda_b} (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau)) + 1/\lambda_{st} \right) \Delta z / 2} \Big|_{(x, y, z - \Delta z, \tau) \in \Omega_2} \end{cases} .$$

С целью расчета энергетических характеристик процесса тепловой обработки разработан метод нестационарного расчета подведенной Q_{in} , рассеянной Q_{out} , выделившейся Q_{hidr} и аккумулированной Q_{acc} теплоты в зависимости от времени тепловой обработки для 3D-изделий. Ниже приведен формульный аппарат, который использовался в САЕ «ПроЭнерго-Бетон-1» при выполнении расчетов.

Суммарная теплота, поступившая извне от источника, рассчитывалась в процессе моделирования на каждый момент времени t_N

$$Q_{in}(t_N) = \sum_{\tau=0 \dots t_N} \left[\sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_1 \\ (x, y + \Delta y, z) \in \Omega_3}} \alpha_{up} \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x, y + \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) \Big|_{T(x, y + \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau) > 0} + \right. \\ \left. + \sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_1 \\ (x, y - \Delta y, z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x, y - \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau)) \Delta x \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b (H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau))} \right) \frac{\Delta y}{2}} \Big|_{T(x, y - \Delta y, z, \tau) - T(x, y, z, \tau) > 0} + \right.$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x+\Delta x,y,z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x+\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) \Delta y \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta x}{2}} \Bigg|_{T(x+\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau) > 0} + \\
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x-\Delta x,y,z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x-\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) \Delta y \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta x}{2}} \Bigg|_{T(x-\Delta x,y,z,\tau) - T(x,y,z,\tau) > 0} + \\
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z+\Delta z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x,y,z+\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) \Delta x \Delta y \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta z}{2}} \Bigg|_{T(x,y,z+\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau) > 0} + \\
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y,z-\Delta z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x,y,z-\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau)) \Delta x \Delta y \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta z}{2}} \Bigg|_{T(x,y,z-\Delta z,\tau) - T(x,y,z,\tau) > 0} \Bigg], \quad (6)
\end{aligned}$$

где τ – время, принимающее дискретные значения от 0 до t_N (N – номер рассматриваемого такта моделирования, соответствующий моменту времени $t_N = N\Delta\tau$); $\Delta\tau$ – шаг дискретизации по времени; Δx , Δy , Δz – шаги дискретизации по пространству; α_{up} – коэффициент теплоотдачи верхней горизонтальной поверхности бетона, соответствующий конвективному теплообмену в воздушной среде.

Суммарную теплоту, рассеянную бетоном во внешнюю среду, находили аналогично (изменилось только направление градиента температуры) на каждый момент времени t_N

$$\begin{aligned}
Q_{out}(t_N) = & \sum_{\tau=0..t_N} \left[\sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y+\Delta y,z) \in \Omega_3}} \alpha_{up} \Delta x \Delta z \Delta \tau (T(x,y,z,\tau) - \right. \\
& \left. - T(x,y+\Delta y,z,\tau)) \Bigg|_{T(x,y,z,\tau) - T(x,y+\Delta y,z,\tau) > 0} + \right. \\
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x,y-\Delta y,z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x,y,z,\tau) - T(x,y-\Delta y,z,\tau)) \Delta x \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta y}{2}} \Bigg|_{T(x,y,z,\tau) - T(x,y-\Delta y,z,\tau) > 0} + \\
& + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x+\Delta x,y,z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x,y,z,\tau) - T(x+\Delta x,y,z,\tau)) \Delta y \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x,y,z,\tau), T(x,y,z,\tau))} \right) \frac{\Delta x}{2}} \Bigg|_{T(x,y,z,\tau) - T(x+\Delta x,y,z,\tau) > 0} \Bigg]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \sum_{\substack{(x,y,z) \in \Omega_1 \\ (x-\Delta x, y, z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x, y, z, \tau) - T(x - \Delta x, y, z, \tau)) \Delta y \Delta z \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau))} \right) \frac{\Delta x}{2}} \Bigg|_{T(x, y, z, \tau) - T(x - \Delta x, y, z, \tau) > 0} + \\
 & + \sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_1 \\ (x, y, z + \Delta z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z + \Delta z, \tau)) \Delta x \Delta y \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{cm}} + \frac{1}{\lambda_\theta(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau))} \right) \frac{\Delta z}{2}} \Bigg|_{T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z + \Delta z, \tau) > 0} + \\
 & + \sum_{\substack{(x, y, z) \in \Omega_1 \\ (x, y, z - \Delta z) \in \Omega_2}} \frac{(T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z - \Delta z, \tau)) \Delta x \Delta y \Delta \tau}{\left(\frac{1}{\lambda_{st}} + \frac{1}{\lambda_b(H(x, y, z, \tau), T(x, y, z, \tau))} \right) \frac{\Delta z}{2}} \Bigg|_{T(x, y, z, \tau) - T(x, y, z - \Delta z, \tau) > 0}
 \end{aligned} \tag{7}$$

Суммарная теплота, выделившаяся при гидратации цемента во всем объеме изделия на момент времени t_N :

$$Q_{hydr}(t_N) = \sum_{\tau=0..t_N} \sum_{(x,y,z) \in \Omega_1} \rho_c P_q(Q, T) \Delta x \Delta y \Delta z \Delta \tau, \tag{8}$$

где $P_q(Q, T)$ – удельная мощность тепловыделения при гидратации цемента, Вт/кг; $Q(x, y, z, \tau)$ – удельная теплота, выделившаяся при гидратации цемента в точке с координатами (x, y, z) на момент времени τ .

Масса изделия определялась как

$$m_b = \sum_{(x,y,z) \in \Omega_1} \rho_b \Delta x \Delta y \Delta z. \tag{9}$$

Средняя температура изделия при тепловой обработке в момент времени τ

$$T_{mid}(\tau) = \frac{1}{m_b} \sum_{(x,y,z) \in \Omega_1} T(x, y, z, \tau) \rho_b \Delta x \Delta y \Delta z. \tag{10}$$

Аккумулированная теплота представляет собой прирост энергии тепловых колебаний молекул и атомов бетона при нагревании всей его массы от температуры $T_{mid}(0)$ до $T_{mid}(\tau)$

$$Q_{acc}(\tau) = c_b m_b (T_{mid}(\tau) - T_{mid}(0)), \tag{11}$$

где c_b – удельная теплоемкость бетона.

Анализ результатов расчета

На основе математического аппарата (5)–(11), реализованного в программе «ПроЭнергоБетон-1», и данных [15] были рассчитаны эволюционные энергетические характеристики $Q_{in}(\tau)$, $Q_{out}(\tau)$, $Q_{hydr}(\tau)$, $Q_{acc}(\tau)$ процесса гидратации бетонных изделий различного размера.

Эволюция изменения подведенной $Q_{in}(\tau)$, рассеянной $Q_{out}(\tau)$, выделившейся $Q_{hydr}(\tau)$ и аккумулированной $Q_{acc}(\tau)$ теплоты в процессе тепло-

вой обработки для объекта № 1 (0,1×0,1×0,1 м) представлена на рис. 1. Как видно из рис. 1, функция подведенной теплоты $Q_{in}(\tau)$ увеличивается на участке нагревания изделия до точки начала этапа режима тепловой обработки «изотермическая выдержка». Рассеянная теплота $Q_{out}(\tau)$ (кривая 2) на этом участке минимальна, а на участке изотермической выдержки начинает увеличиваться. Кривая 3, характеризующая процесс выделения энергии $Q_{hydr}(\tau)$ в процессе гидратации, увеличивается по нелинейному закону от времени тепловой обработки. Суммарная теплота $Q_{acc}(\tau)$ (кривая 4), аккумулируемая изделием, подвергнутым тепловой обработке, изменяется по закону, близкому к режиму работы нагревателя.

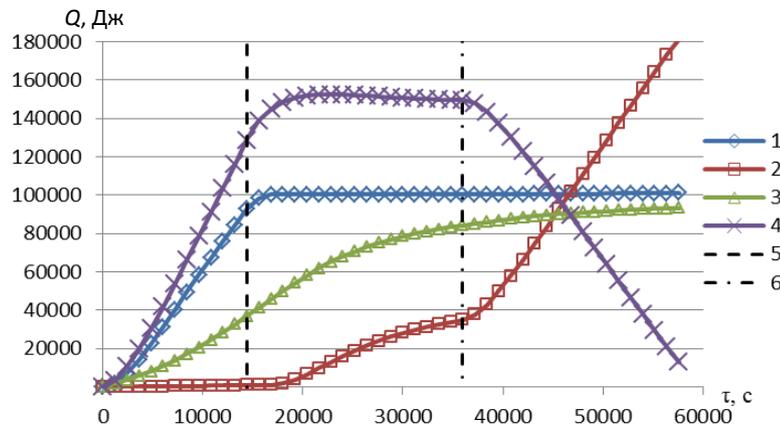


Рис. 1. Эволюция подведенной, рассеянной, выделившейся и аккумулированной теплоты в процессе тепловой обработки объекта № 1: 1 – $Q_{in}(\tau)$; 2 – $Q_{out}(\tau)$; 3 – $Q_{hydr}(\tau)$; 4 – $Q_{acc}(\tau)$; 5, 6 – начало и конец изотермической выдержки

Fig. 1. Evolution of supplied, dissipated, emitted and accumulated heat during heat treatment for object No 1: 1 – $Q_{in}(\tau)$; 2 – $Q_{out}(\tau)$; 3 – $Q_{hydr}(\tau)$; 4 – $Q_{acc}(\tau)$; 5, 6 – beginning and the end of isothermal exposure

Функции скоростей изменения подведенной $\partial Q_{in}(\tau)/\partial \tau$, рассеянной $\partial Q_{out}(\tau)/\partial \tau$, выделившейся $\partial Q_{hydr}(\tau)/\partial \tau$ и аккумулированной $\partial Q_{acc}(\tau)/\partial \tau$ тепловых энергий показаны на рис. 2. Как видно из рисунка, для всех указанных функций могут быть выделены три участка, разграниченные моментами времени перехода от одного этапа теплового режима обработки к другому (вертикальные линии). Первый участок связан с этапом нагрева изделия и заканчивается в момент времени перехода к изотермической выдержке. Второй участок характеризует период изотермической выдержки. Третий – соответствует периоду охлаждения изделия. Можно видеть, что наиболее интенсивно скорость изменения во времени рассеянной теплоты $Q_{out}(\tau)$ (рис. 2, кривая 2) растет на участке охлаждения, а также в середине изотермической площадки. Скорость изменения подведенной теплоты $Q_{in}(\tau)$ (рис. 2, кривая 1) увеличивается только на участке нагрева, резко уменьшаясь на участке изотермической выдержки.

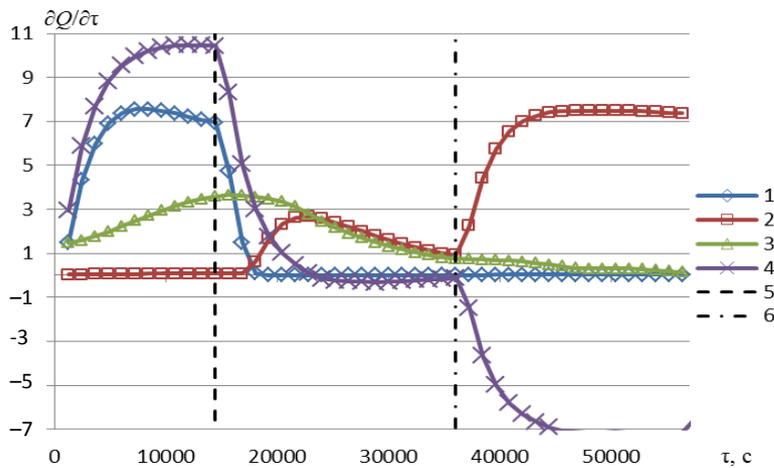


Рис. 2. Эволюция скорости изменения подведенной, рассеянной, выделившейся и аккумулированной энергии в процессе тепловой обработки для объекта № 1:
 1 – $\partial Q_{in}(\tau)/\partial \tau$; 2 – $\partial Q_{out}(\tau)/\partial \tau$; 3 – $\partial Q_{hidr}(\tau)/\partial \tau$; 4 – $\partial Q_{acc}(\tau)/\partial \tau$;
 5, 6 – начало и конец изотермической выдержки

Fig. 2. Evolution of the rate of alteration of the supplied, scattered, emitted and accumulated energy in the heat treatment process for the object No 1:
 1 – $\partial Q_{in}(\tau)/\partial \tau$; 2 – $\partial Q_{out}(\tau)/\partial \tau$; 3 – $\partial Q_{hidr}(\tau)/\partial \tau$; 4 – $\partial Q_{acc}(\tau)/\partial \tau$;
 5, 6 – beginning and the end of isothermal exposure

На следующем этапе исследования была поставлена задача проанализировать влияние объема изделия на одну из энергетических характеристик. Эволюция изменения аккумулированной $Q_{acc}(\tau)$ тепловой энергии в процессе тепловой обработки бетонных изделий разного объема показана на рис. 3, 4. Как видно из рисунков, с увеличением объема изделия от объекта № 1 до объекта № 4 наблюдается рост функции аккумулированной тепловой энергии. Важно отметить, что представленные данные являются количественными и позволяют рассчитать изменение функции аккумулированной изделием тепловой энергии в процессе тепловой обработки в зависимости от заданного объема 3D-изделия и его конфигурации.

Таким образом, при наличии сложных в пространственном отношении бетонных изделий, особенно имеющих неоднородную структуру, подобные расчеты, выполняемые по всему пространству изделия, позволяют получать гораздо более точную информацию об энергетических затратах в течение различных фаз процесса гидратации бетона, чем в случае использования моделей с сосредоточенными параметрами, в которых объем изделия задается не распределением, а числом.

Результаты моделирования для коэффициента гидратации в выделенных точках A_0, A_1, A_2, A_3 объекта № 1, подвергнутого тепловой обработке, представлены в табл. 1. Положение указанных точек относительно поверхности изделия и друг друга было следующим: A_0 (0,05; 0; 0,05); A_1 (расстояние $a = 0,0125$ м от A_0); A_2 ($a = 0,0225$ м от A_0); A_3 ($a = 0,05$ м от A_0). Точка A_0 находится в центре грани изделия, A_3 соответствует его геометрии.

ческом центре. Промежуточные точки A_1 и A_2 находятся на линии, соединяющей центр изделия с центром грани. Точка A_{00} характеризует функцию температурного режима тепловой обработки. Все данные можно сравнивать с функцией режима тепловой обработки $T(\tau)$ изделия (табл. 1, второй столбец).

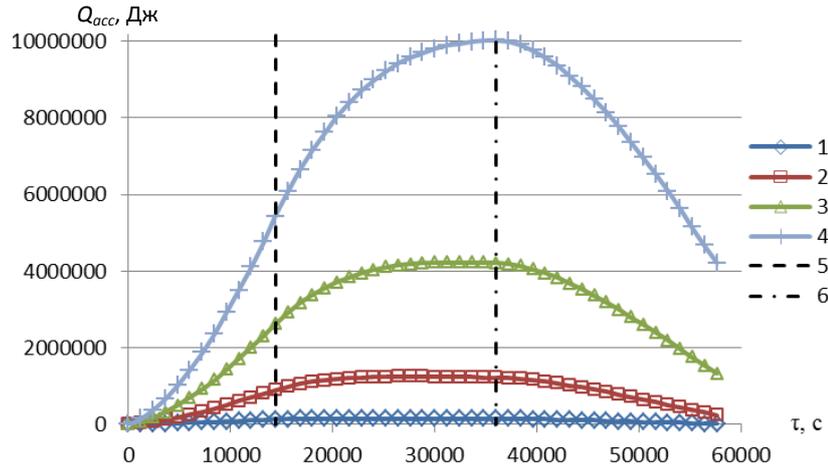


Рис. 3. Эволюция изменения аккумулированной $Q_{acc}(\tau)$ энергии в процессе тепловой обработки бетонных изделий разного объема для объектов: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5, 6 – начало и конец изотермической выдержки

Fig. 3. Evolution of alteration in accumulated $Q_{acc}(\tau)$ energy in the process of heat treatment of concrete products of different volumes for objects: 1 – No 1; 2 – No 2; 3 – No 3; 4 – No 4; 5, 6 – beginning and the end of isothermal exposure

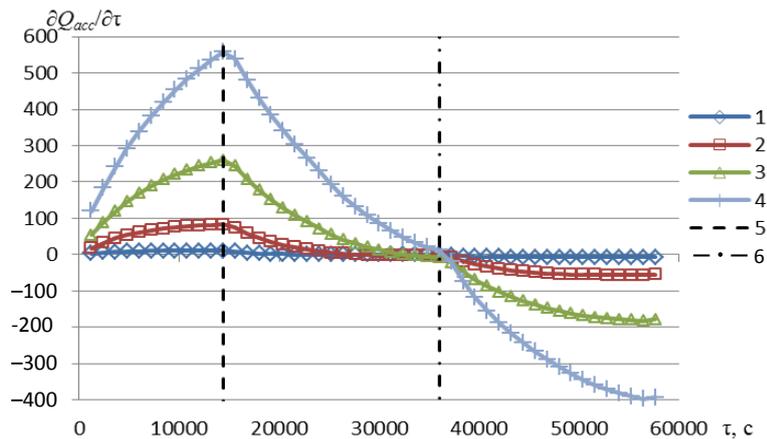


Рис. 4. Эволюция скорости изменения аккумулированной $\partial Q_{acc}(\tau)/\partial \tau$ энергии в процессе тепловой обработки бетонных изделий разного объема для объектов: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5, 6 – начало и конец изотермической выдержки

Fig. 4. Evolution of the rate of alteration of the accumulated $\partial Q_{acc}(\tau)/\partial \tau$ energy in the process of heat treatment of concrete products of different volumes for objects: 1 – No 1; 2 – No 2; 3 – No 3; 4 – No 4; 5, 6 – beginning and the end of isothermal exposure

Как видно из табл. 1, степень гидратации в выделенных точках увеличивается с течением времени тепловой обработки для всех рассмотренных точек и всех изделий.

Таблица 1

Значения коэффициента гидратации H в зависимости от времени тепловой обработки τ в выделенных точках куба A_i изделия № 1

The values of the coefficient of hydration H depending on the heat treatment time τ in the selected points of the cube A_i of product No 1

τ, c	$T, ^\circ C (A_{00})$	$H, \%$			
		A_0	A_1	A_2	A_3
0	20	0,000498	0,000498	0,000498	0,000498
1200	25,42	1,2100	1,2071	1,2052	1,2036
2400	30,84	2,5102	2,4973	2,4888	2,4805
3600	36,26	3,9614	3,9345	3,9166	3,8986
4800	41,68	5,5974	5,5545	5,5257	5,4967
6000	47,10	7,4339	7,3742	7,3340	7,2933
7200	52,52	9,4745	9,3986	9,3472	9,2951
8400	57,94	11,711	11,619	11,557	11,494
9600	63,36	14,133	14,027	13,956	13,883
1,08E + 04	68,78	16,726	16,607	16,526	16,444
1,20E + 04	74,20	19,461	19,333	19,245	19,156
1,32E + 04	79,62	22,312	22,174	22,080	21,985
1,44E + 04	85	25,247	25,103	25,005	24,905
1,56E + 04	85	28,235	28,088	27,988	27,886
1,68E + 04	85	31,214	31,070	30,972	30,872
1,80E + 04	85	34,135	33,999	33,905	33,809
1,92E + 04	85	36,972	36,845	36,757	36,668
2,04E + 04	85	39,711	39,593	39,512	39,430
2,16E + 04	85	42,257	42,161	42,094	42,026
2,28E + 04	85	44,522	44,445	44,391	44,336
2,40E + 04	85	46,528	46,467	46,425	46,381
2,52E + 04	85	48,303	48,254	48,221	48,186
2,64E + 04	85	49,871	49,833	49,806	49,779
2,76E + 04	85	51,257	51,227	51,206	51,185
2,88E + 04	85	52,482	52,459	52,442	52,426
3,00E + 04	85	53,566	53,548	53,535	53,522
3,12E + 04	85	54,526	54,512	54,502	54,491
3,24E + 04	85	55,376	55,364	55,357	55,349
3,36E + 04	85	56,129	56,120	56,114	56,108
3,48E + 04	85	56,798	56,791	56,786	56,781
3,60E + 04	85	57,434	57,427	57,422	57,417
3,72E + 04	81,26	58,052	58,045	58,041	58,036
3,84E + 04	77,53	58,651	58,644	58,64	58,636
3,96E + 04	73,79	59,226	59,222	59,219	59,215

Окончание табл. 1

τ, c	$T, ^\circ C (A_{00})$	$H, \%$			
		A_0	A_1	A_2	A_3
$4,08E + 04$	70,06	59,772	59,769	59,767	59,764
$4,20E + 04$	66,32	60,279	60,279	60,280	60,280
$4,32E + 04$	62,58	60,741	60,746	60,748	60,750
$4,44E + 04$	58,83	61,148	61,158	61,164	61,170
$4,56E + 04$	55,07	61,493	61,509	61,519	61,529
$4,68E + 04$	51,32	61,770	61,791	61,806	61,820
$4,80E + 04$	47,57	62,021	62,042	62,056	62,071
$4,92E + 04$	43,81	62,272	62,293	62,307	62,322
$5,04E + 04$	40,06	62,523	62,544	62,558	62,573
$5,16E + 04$	36,30	62,773	62,794	62,809	62,823
$5,28E + 04$	32,55	63,006	63,030	63,047	63,064
$5,40E + 04$	28,80	63,209	63,238	63,257	63,276
$5,52E + 04$	25,04	63,370	63,402	63,423	63,445
$5,64E + 04$	21,29	63,491	63,527	63,551	63,576
$5,76E + 04$	20	63,598	63,634	63,659	63,684
$5,88E + 04$	20	63,706	63,742	63,766	63,791

Зависимость от времени τ производной коэффициента гидратации $\partial H/\partial \tau$ для центральной пространственной точки объектов № 1, 2, 3, 4 представлена на рис. 5.

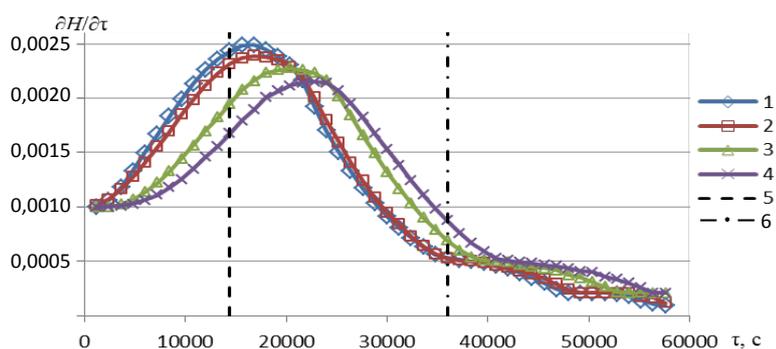


Рис. 5. Зависимость скорости изменения коэффициента гидратации $\partial H/\partial \tau$ от времени твердения τ в центре изделия (точка A_3) для объектов: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5, 6 – время начала и конца изотермической выдержки

Fig. 5. Dependence of the rate of alteration of the hydration coefficient $\partial H/\partial \tau$ on the hardening time τ at the center of the product (point A_3) for objects: 1 – No 1; 2 – No 2; 3 – No 3; 4 – No 4; 5, 6 – beginning and the end of isothermal exposure

Как видно из рис. 5, в интервале времени изотермической выдержки для всех изделий имеется максимум скорости изменения коэффициента гидратации, причем наибольшая наблюдается для объекта № 1. Из рисунка видно, что с увеличением объема изделия максимальная скорость изменения коэффициента гидратации уменьшается.

Функция скорости гидратации изменяется аналогично закону Гаусса. Однако при переходе времени тепловой обработки от периода «изотермическая выдержка» к периоду «охлаждение» наблюдаются некоторые отклонения в изменении степени гидратации от этого закона, что связано с резким изменением условий охлаждения, сопровождающегося снижением температуры. Следует отметить наличие эффекта запаздывания в изменении скорости гидратации $\partial H/\partial \tau$, что подтверждает нестационарность предлагаемой модели процесса твердения.

ВЫВОДЫ

1. На основе предложенной теплофизической 3D-модели, в основе которой лежат уравнение теплопроводности с источником гидратации и система начальных и граничных условий, разработан численный метод определения энергетических характеристик твердеющего 3D-изделия из бетона, подвергнутого тепловой обработке. Метод позволяет рассчитывать эволюцию энергетических характеристик процесса изготовления бетонного изделия в зависимости от времени тепловой обработки.

2. В результате расчета функции $T(x, y, z, \tau)$, характеризующей эволюцию температурного поля, и $H(x, y, z, \tau)$, описывающей эволюцию степени гидратации в бетоне, предложен математический аппарат, позволяющий вычислять следующие характеристики в процессе тепловой обработки изделий: подведенную Q_{in} , рассеянную Q_{out} , выделившуюся Q_{hydr} и аккумулированную Q_{acc} тепловую энергию.

3. Выполнены численные расчеты функций коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ и энергетических характеристик $Q_{in}(\tau)$, $Q_{out}(\tau)$, $Q_{hydr}(\tau)$, $Q_{acc}(\tau)$ для бетонных 3D-изделий размерами 0,1×0,1×0,1; 0,2×0,2×0,2; 0,3×0,3×0,3 и 0,4×0,4×0,4 м. На основе исследований скорости изменения коэффициента гидратации $H(x, y, z, \tau)$ показано, что при заданном температурном режиме с уменьшением объема бетонного изделия, подвергаемого тепловой обработке, увеличивается максимальная скорость изменения коэффициента гидратации и эти изменения оказывают существенное влияние на энергетические характеристики $Q_{in}(\tau)$, $Q_{out}(\tau)$, $Q_{hydr}(\tau)$, $Q_{acc}(\tau)$.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ждановский, Б. В. Прямые и косвенные энергозатраты при производстве бетонных и железобетонных изделий, конструкций и сооружений / Б. В. Ждановский, К. А. Исрафилов, А. К. Ахмедов // Системные технологии. 2018. № 26. С. 118–120.

2. Аксенчик, К. В. Оценка энергетической эффективности тепловых установок для тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / К. В. Аксенчик // Актуальные направления научных исследований XXI в.: теория и практика: сб. науч. тр. по матер. Междунар. заочной науч.-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВПО «ВЛГТА», 2014. № 3, ч. 1. С. 204–211.
3. Федосов, С. В. Применение методов математической физики для моделирования массо- и энергопереноса в технологических процессах строительной индустрии / С. В. Федосов, А. М. Ибрагимов, А. В. Гуцин // Строительные материалы. 2008. № 4. С. 65–67.
4. Моделирование набора прочности бетоном при гидратации цемента / С. В. Федосов [и др.] // Строительные материалы. 2011. № 11. С. 38–41.
5. Фролов, С. В. Математическое моделирование процесса тепловлажностной обработки бетонных и железобетонных изделий / С. В. Фролов, А. В. Лагутин // Инженерно-физический журнал. 2002. Т. 75, № 3. С. 151–155.
6. Обьещенко, Г. А. Математическая модель гидратации цемента и эффективные режимы ТВО бетона / Г. А. Обьещенко, Е. И. Шифрин // Бетон и железобетон. 1991. № 12. С. 9–11.
7. Математическая модель твердения бетона в условиях тепловой обработки заводов ЖБИ / Ю. Ю. Громов [и др.] // Вестник ТГУ. 2001. Т. 6, вып. 3. С. 344–345.
8. Ge, Zh. Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete: Retrospective Theses and Dissertations [Electronic resource] / Zh. Ge // Iowa State University. 2005. Mode of access: <https://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2729&context=rted>. Date of access: 14.12.2018.
9. Бибик, М. С. Об энергосберегающих режимах тепловой обработки бетонных и железобетонных изделий / М. С. Бибик, В. В. Бабицкий // Строительная наука и техника. 2010. № 4. С. 55–59.
10. Бабицкий, В. В. Многофакторное проектирование состава бетона / В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев // Материалы, технологии, инструменты. 2005. № 1. С. 67–71.
11. Дворкин, О. Л. Проектирование составов бетона (основы теории и методологии) / О. Л. Дворкин. Ровно: УДУВГП, 2003. 265 с.
12. Соколов, А. М. Научные основы процессов электротепловой обработки композиционных материалов в производстве конструкционного бетона / А. М. Соколов. Иваново, 2012. 38 с.
13. Аксенчик, К. В. Математическая модель внутреннего тепло- и массообмена в бетонных плитах, подвергаемых тепловлажностной обработке / К. В. Аксенчик, Н. И. Шестаков // Вестник Череповецкого государственного университета. 2008. Т. 19, № 4. С. 143–146.
14. Подгорнов, Н. И. Математическая формулировка задачи определения температуры бетона при термообработке в гелиокамерах типа «горячего ящика» / Н. И. Подгорнов, Д. Д. Коротеев // Вестник РУДН, серия Инженерные исследования. 2014. № 1. С. 131–135.
15. Повышение энергетической эффективности теплотехнологического оборудования на основе численного моделирования нестационарных процессов / А. М. Нияковский [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>.
16. Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках / А. М. Нияковский [и др.] // Наука и техника. 2019. Т. 18, № 2. С. 137–145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
17. Нияковский, А. М. Оптимальные условия термообработки как фактор формирования рациональной теплоэнергетической системы предприятий железобетонных изделий / А. М. Нияковский // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2018. Т. 1. С. 93.

18. Нияковский, А. М. Температурные поля в твердеющем бетоне / А. М. Нияковский, Э. И. Гончаров // Тезисы докл. 48-й Междунар. науч.-техн. конф. преподав. и студ., посвящ. 50-летию ун-та. Витебск: ВГТУ, 2015. С. 103–104.
19. Красулина, Л. В. Структурные и теплофизические свойства твердеющего бетона / Л. В. Красулина // Наука и техника. 2012. № 2. С. 29–34.

Поступила 26.03.2019 Подписана в печать 28.05.2019 Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Zhadanovskii B.V., Israfilov K. A., Akhmedov A. K. (2018) Direct and Indirect Energy Consumption Costs During the Production of Concrete and Reinforced Concrete Products, Constructions and Structures. *Sistemnye Tekhnologii* [System Technologies], (26), 118–120 (in Russian).
2. Aksenchik K. V. (2014) Assessment of Energy Efficiency of Thermal Installations for Heat and Humidity Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Aktual'nye Napravleniya Nauchnykh Issledovaniy XXI Veka: Teoriya i Praktika: Sb. Nauch. Tr. po Mater. Mezhdunar. Zaochnoi Nauch.-Prakt. Konf.* [Topical Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice: Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the International Correspondence Scientific-and-Practical Conference]. Voronezh, Voronezh State University of Forestry and Technologies, (3) Part 1, 204–211 (in Russian).
3. Fedosov S. V., Ibragimov A. M., Gushchin A. V. (2008) Application of Methods of Mathematical Physics for Modeling of Mass and Energy Transfer in Technological Processes of the Construction Industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], (4), 65–67 (in Russian).
4. Fedosov S. V., Bobylev V. I., Ibragimov A. M., Kozlova V. K., Sokolov A. M. (2011) Modeling of Concrete Strength Gain During Cement Hydration. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials], (11), 38–41 (in Russian).
5. Frolov S. V., Lagutin A. V. (2002) Mathematical Modeling of the Process of Heat and Moist Treatment of Concrete and Reinforced-Concrete Products. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 75 (3), 712–718. <https://doi.org/10.1023/A:1016821913714>.
6. Ob'eshchenko G. A., Shifrin E. I. (1991) The Mathematical Model of Cement Hydration and Effective Modes of Concrete Heat Treatment. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], (12), 9–11 (in Russian).
7. Gromov Yu. Yu., Ivanova O. G., Lagutin A. V., Lutkhon T. (2001) Mathematical Model of Concrete Hardening in the Conditions of Heat Treatment of Concrete Products Plants. *Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Tomsk State University Journal*, 6 (3), 344–345 (in Russian).
8. Ge Zh. (2005) *Predicting Temperature and Strength Development of the Field Concrete*. Iowa State University. 215. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-15373>.
9. Bibik M. S., Babitskii V. V. (2010) On Energy-Preserving Modes of Heat Treatment of Concrete and Reinforced Concrete Products. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (4), 55–59 (in Russian).
10. Babitskii V. V., Kovalev Ya. N. (2005) Multifactorial Design of Composition of Concrete. *Materialy, Tekhnologii, Instrument* [Materials, Technologies, Tools], (1), 67–71 (in Russian).
11. Dvorkin O. L. (2003) *Design of Compositions of Concrete (Fundamentals of Theory and Methodology)*. Rovno, National University of Water and Environmental Management. 265 (in Russian).

12. Sokolov A. M. (2012) *Scientific Fundamentals of Electrothermal Processing of Composite Materials in the Production of Structural Concrete*. Ivanovo. 38 (in Russian).
13. Aksenchik K. V., Shestakov N. I. (2008) Mathematical Model of Internal Heat and Mass Exchange in Concrete Slabs Subjected to Heat and Moisture Treatment. *Vestnik Cherepovetskogo Gosudarstvennogo Universiteta = Cherepovets State University Bulletin*, 19 (4), 143–146 (in Russian).
14. Podgornov N. I., Koroteev D. D. (2014) Mathematical Formulation of the Problem of Determining the Temperature of Concrete During Heat Treatment in Solar Chamber of the “Hot Box” Type. *Vestnik RUDN, seriya Inzhenernyye Issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Researches*, (1), 131–135 (in Russian).
15. 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. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii i Energeticheskikh Obiedinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 62 (2), 177–191 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-177-191>.
16. 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 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
17. Niyakovskii A. M. (2018) Optimal Heat Treatment Condition as a Factor in the Formation of Rational Energy System of Enterprises of Concrete Products. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 16-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science for Education, Manufacturing, Economy: Materials of the 16th International Scientific-and-Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 93 (in Russian).
18. Niyakovskii A. M. (2015) Temperature Fields in Hardening Concert. *Tezisy Dokl. 48-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. Prepodav. i Stud., Posvyashch. 50-letiyu Un-ta* [Abstracts of the 48th International Scientific-and-Technical Conference of Teachers and Students Dedicated to the 50th Anniversary of the University]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 103–104 (in Russian).
19. Krasulina L. V. (2012) Structural and Thermophysical Properties of Hardening Concrete. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, (2), 29–34 (in Russian).

Received: 26 March 2019

Accepted: 28 May 2019

Published online: 31 July 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-325-340>

УДК 697.92

Об энергоэффективности кондиционирования воздуха в помещении

С. Н. Осипов¹⁾, А. В. Захаренко¹⁾, Е. М. Широкова²⁾

¹⁾ГП «Институт жилища – НИПТИС имени Атаева С. С.» (Минск, Республика Беларусь),

²⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Повышение средних температур наружного воздуха и их колебания за последние 20 лет (подтверждением могут служить рекорды летних температур в нашей стране) существенно увеличивают потребность в кондиционировании воздуха в помещениях с длительным присутствием людей, особенно при их большом скоплении (магазины, зрелищные залы, учебные аудитории и т. п.). Процесс кондиционирования достаточно энергоемкий, однако рост благосостояния во многих республиках бывшего СССР, а также увеличивающаяся с каждым годом сложность физиологической адаптации организма человека к повышающимся температурам наружного воздуха обуславливают возможность и одновременно необходимость массового внедрения данных систем. При этом важно учитывать, что цены на электроэнергию в настоящее время сохраняются на достаточно высоком уровне и для владельцев жилья в течение ближайших лет будут только расти. Поэтому разработка новых способов существенного роста энергоэффективности процесса кондиционирования воздуха в помещениях представляет несомненный интерес. Один из таких способов – использование ламинарных или близких к ним подвижных слоев кондиционированного воздуха в ограниченной зоне работы или отдыха людей. Такой зоной, высотой около 1,0–1,2 м от пола, в каждой квартире является, например, жилая комната (спальня), в которой при помощи простых воздухоподающих и воздухозаборных устройств создаются нормативные температурные условия. В случае сидячей работы людей высота зоны кондиционированного воздуха должна увеличиваться до 1,3–1,5 м. В настоящее время уже установлено, что использование ламинарных или близких к ним воздушных потоков благодаря существенно пониженному теплообмену с окружающими нагретыми поверхностями позволяет уменьшать расход электроэнергии в два и более раз. Кроме этого, необходимо отметить простоту подобных систем. В частности, при современных системах контроля и управления кондиционированием воздуха в «обязанности» потребителей входит только установка на управляющем приборе исходных данных, касающихся непосредственно требуемых параметров микроклимата. При этом следует отметить отсутствие в настоящее время целостного научно-технического описания аэродинамических и теплообменных процессов в зоне кондиционирования. Даже в современных условиях для стран с резко континентальным климатом (Россия, Казахстан и др.) проблемой является выбор типа кондиционера для эффективного его использования

Адрес для переписки

Осипов Сергей Николаевич
ГП «Институт жилища –
НИПТИС имени Атаева С. С.»
ул. Ф. Скорины, 15б,
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

Address for correspondence

Osipov Sergey N.
UE “Institute of Housing –
NIPTIS named after Ataev S. S.”
15b F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 263-81-91
up-niptis@rambler.ru

в жаркие периоды лета. В общем, можно отметить, что все проблемы энергоэффективного применения кондиционеров необходимо решать комплексно.

Ключевые слова: энергоэффективное кондиционирование, ламинарные потоки, место отдыха, рабочее место, расчет

Для цитирования: Осипов, С. Н. Об энергоэффективности кондиционирования воздуха в помещении / С. Н. Осипов, А. В. Захаренко, Е. М. Широкова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 325–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-325-340>

On the Energy Efficiency of Indoor Air Conditioning

S. N. Osipov¹⁾, A. V. Zakharenko¹⁾, E. M. Shirokova²⁾

¹⁾UE “Institute of Housing – NIPTIS named after Ataev S. S.” (Minsk, Republic of Belarus),

²⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The increase of average outdoor temperatures and their fluctuations over the past 20 years (as evidenced by the records of summer temperatures in our country) has significantly increased the need for air conditioning premises where people are present for a long time, especially when they are crowded (shops, entertainment halls, classrooms, etc.). The air conditioning process is quite energy-intensive, but the growth of well-being in many republics of the former USSR, as well as the increasing complexity of the physiological adaptation of the human body to rising outdoor temperatures make it possible (and at the same time necessary) to implement these systems on a large scale. It is important to take into account that electricity prices are currently maintained at a high level for homeowners, and in the coming years the prices will only grow. Therefore, the development of new ways of significant increase of the energy efficiency of the indoor air conditioning process is of a great interest. One of these methods is the use of laminar (or close to them) moving layers of conditioned air in a limited area of work or rest of people. Such a zone, about 1.0–1.2 m height from a floor in each apartment is, e.g., living rooms (bedroom) in which standard temperature conditions are created by means of simple air supplying and air intake devices. In the case of sedentary work of people, the height of such a zone of conditioned air should be increased to 1.3–1.5 m. It has already been established that the use of laminar (or close to them) air flows allows to reduce the power consumption by two or more times due to significantly reduced heat exchange with the surrounding heated surfaces. Besides, the simplicity of such systems ought to be noted. In particular, in conditions of modern systems of control and management of air conditioning, the "duties" of consumers include only the installation on the control device of the initial data relating directly to the required parameters of the microclimate. At the same time, it should be noted that there is currently no complete scientific and technical description of aerodynamic and heat exchange processes in the air conditioning zone. Even in modern conditions for countries with a sharply continental climate (Russia, Kazakhstan, etc.), the problem is the choice of the type of air conditioner for its effective use in hot periods of summer. In general, it can be noted that all the problems of energy-efficient use of air conditioners must find a comprehensive solution.

Keywords: energy-efficient air conditioning, laminar flows, place of rest, workplace, calculation

For citation: Osipov S. N., Zakharenko A. V., Shirokova E. M. (2019) On the Energy Efficiency of Indoor Air Conditioning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 325–340. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-325-340> (in Russian)

Введение

В последнее время кондиционирование воздуха в помещениях различного назначения становится особенно необходимым в связи с ростом неравномерности климатических температур, с повышением уровня сложности многих производственных процессов, а также для обеспечения комфортабельного отдыха людей. Поэтому повышение энергоэффективности систем кондиционирования воздуха – актуальная задача.

Основу энергоэффективного кондиционирования составляют следующие условия: уменьшение охлаждаемых объемов помещений, ограничение этих объемов теплоизолирующими материалами и существенное уменьшение перемешивания кондиционированных потоков воздуха с окружающими теплыми. Если первые два условия не требуют научного анализа, то третье нуждается в значительных научных исследованиях.

В физической основе третьего условия лежат организация и использование слоевых ламинарных или близких к ним потоков в зонах длительного (в течение часов) пребывания людей. Результаты наиболее значимых исследований слоевых потоков в помещениях стали известны со второй половины XX в. [1, 2]. Так, в [1] приведена зависимость искривления оси охлажденной струи с применением критерия Архимеда (Ar), а в [2] описывается процесс перемешивания легкого газа (метана в горных выработках угольных шахт) со спутным турбулентным потоком воздуха с образованием слоя с использованием критерия Ричардсона (Ri) и слоевого числа. Утверждается, что при $c_w/c_f > 3$ (c_w – коэффициент трения для турбулентного потока воздуха по слою; c_f – коэффициент трения для основного потока) для горизонтальных горных выработок, в которых образуются длинные слои, число расслоения лежит в пределах от 1 до 2. Для чисел расслоения более 5 слои практически не образуются.

Среди других выделяется публикация А. П. Нетюхайло [3], где на основании анализа соотношений между энергиями турбулентности и гравитационной в неоднородном по плотности потоке оценивается устойчивость расслоения течения в соответствии с Ri , для которого критическое значение равно 2. Указывается, что по исследованиям других авторов критическое значение $Ri \approx 0,25$. Такое большое различие критических значений Ri для решения поставленной задачи обуславливает использование классических дифференциальных уравнений движения и сплошности пограничного слоя раздела для жидкостей с плотным расслоением. В [3] показано, что при воздействии спутного турбулентного потока потеря устойчивости ламинарного течения может характеризоваться следующей зависимостью:

$$C_{кр} = Re_{\delta} Fr_{\delta}^n = \frac{1}{A_{кр}^3}, \quad (1)$$

где Re_{δ} , Fr_{δ} – критерий Рейнольдса и Фруда для динамического пограничного слоя раздела потоков; $A_{кр}$ – показатель, зависящий от многих (пяти) коэффициентов.

Анализ нейтральных кривых устойчивости позволил определить численные значения параметра устойчивости для каждой формы движения: 1 – безволновое ламинарное течение при $A_1 \geq 0,19$; 2 – движение регулярных волн при $A_2 \geq 0,125-0,190$; 3 – движение неустойчивых волн при $A_3 \geq 0,108-0,125$; 4 – коротковолновое движение при $A_4 \geq 0,085-0,108$; 5 – турбулентное движение при $A_5 < 0,085$.

Хотя различие величин $A_{кр}$ между устойчивыми ламинарным и турбулентным течениями всего в 2,2 раза, но с учетом (1) различие в величинах $C_{кр}$ составляет уже $2,23^3 \approx 11,2$ раза. Однако эти данные были получены для H_2O , вязкость которой при температуре 15 °С примерно в 60 раз больше вязкости воздуха. Кроме того, другие ее свойства также сильно отличаются, что может кардинально влиять на физику формирования вида течения.

Для оценки скорости всплывания более легкого газа через более тяжелый или наоборот можно использовать решение дифференциального уравнения конвективной диффузии [4] и два новых критерия: гравитации $K_{гр} = gH^3/\nu_v D_0$ и конвективно-диффузионного переноса примеси $K_{к.п} = -\nu_{ср} H/D_y$ (где g – ускорение свободного падения; H – высота выработки; ν_v – вязкость воздуха; D_0, D_y – коэффициенты диффузии; $\nu_{ср}$ – средняя скорость всплывания метана). Расчетные данные хорошо согласуются с данными экспериментов в шахтах Донбасса при стационарной диффузии CH_4 и в шахтах Кузбасса при нестационарной диффузии CH_4 .

В 1978 г. в Московском инженерно-строительном институте А. И. Челышевым была защищена сугубо экспериментальная работа по изменению температуры воздуха по высоте вентилируемого производственного помещения с избытками теплоты [5], что свидетельствует об отсутствии существенных аналитических разработок этого важного вопроса в то время, хотя при описании поисков его решения упоминается ряд фамилий исследователей.

Интересные научные результаты исследования режимов движения воздуха в помещениях приведены в учебнике В. Н. Богословского [6, с. 42, 43, 304], где сказано, что верхняя граница ламинарной области соответствует критическому значению $GrPr_{кр} = 1,7 \cdot 10^8$. Для полной высоты ламинарной зоны среднеинтегральное значение критерия Нуссельта $Nu = 68,5$. Отмечается температурное расслоение воздуха по высоте помещения, по которому производится оценка эффективности обогрева. Наилучшим является обогрев при равномерном распределении температуры по высоте, что происходит при напольном отоплении [6, рис. VI.7].

В 1982 г. в СССР появился способ [7], который основывается на том, что с целью поддержания заданной относительной влажности в различных зонах помещения обработку наружного и рециркуляционного потоков воздуха необходимо осуществлять соответственно до заданных минимального и максимального значений влагосодержания, а смешивание производить в количествах, определяемых заданным влагосодержанием для каждой зо-

ны. Отдельно также предусматривался нагрев смеси потоков наружного и рециркуляционного воздуха до заданной температуры. К основным недостаткам данного способа при использовании ламинарных потоков воздуха можно отнести определенную сложность точного определения нормируемых параметров воздушных масс в изменяющихся условиях окружающей среды, а также высокую энергоемкость процессов их смешивания и подогрева.

В 1987–1991 гг. БПИ было получено пять авторских свидетельств на способы распределения воздуха в помещении [8–10] и еще шесть аналогичных способов, заявленных через Белорусский НИИ средств автоматизации, получивших положительные решения, но объявленных «для служебного пользования» (заявки № 4713140/29/090616 с пр. от 03.07.1989; № 4741673/29/122013 с пр. от 29.02.1989; № 467713/23-29/052385 с пр. от 11.04.1989; № 4685727/23-29/062343 с пр. от 03.05.1989; № 4671956/23-29/046854 с пр. от 03.04.1989; № 4716025/29/092430 с пр. от 05.07.1989).

Однако проблема энергоэффективного кондиционирования воздуха в зонах отдыха или работы одного или близко расположенных нескольких людей путем использования ламинарных потоков не была решена до 2009 г., когда был получен евразийский патент [11]. Такое положение сохраняется до сих пор, по-видимому, потому, что изготовителям кондиционеров и установщикам систем просто невыгодно применять энергоэффективные системы кондиционирования, а потребители не информированы о таких системах. Поэтому в данной статье приведены возможные варианты и достаточно простые примеры расчета необходимой производительности кондиционеров.

Основы энергоэффективного кондиционирования воздуха в ограниченных зонах помещений

Один из наиболее известных способов кондиционирования воздуха в помещении, повышающий экономичность данного процесса, заключается в обеспечении такого режима движения потоков кондиционированного воздуха, при котором сохраняются ламинарный или интенсивно-ламинарный потоки во всей кондиционируемой зоне, что приводит к резкому уменьшению интенсивности теплообмена с ограждающими поверхностями и приграничной областью соприкосновения сред различных зон. Основной принцип реализации данного способа заключается в обработке воздуха и подаче его в ограниченную зону помещения, а затем – в заборе отработанного объема воздуха, образуя при этом два противоточных воздушных потока с обеспечением допустимого перепада по температуре и интенсивного ламинарного режима свободных конвективных потоков в самой ограниченной зоне помещения. На твердых ограждениях зоны ламинарного режима в пограничном слое и ламинарного режима в приграничной области соприкосновения сред различных зон происходит уменьшение интенсив-

ности теплообмена, что позволяет резко сократить расход энергии на обеспечение требуемого температурного режима.

Интересен парадоксальный вариант кондиционирования воздуха в помещении с использованием систем лучистого потолочного отопления для охлаждения помещений в летнее время [12, с. 409–414; 13, с. 83–90]. Конструкция подобных систем представляла собой встроенные в железобетонное перекрытие трубчатые змеевики, по которым пропусклась холодная вода. Охлаждаемая таким образом потолочная поверхность способствовала охлаждению всего помещения, посредством чего создавались комфортные условия для пребывания человека в данном помещении даже при очень высоких наружных температурах воздуха. Несмотря на выявленную эффективность подобных систем, необходимость в больших площадях радиационных панелей (что приводит к усложнению конструкции и значительным тепловым потерям) была признана существенным недостатком при решении о массовом внедрении подобных систем радиационного охлаждения помещений в зданиях.

Описанный далее способ кондиционирования воздуха в помещении обеспечивает уменьшение энергозатрат путем снижения интенсивности теплообмена между ограждающими поверхностями и некондиционируемой зоной за счет ламинарных режимов движения кондиционируемых потоков воздуха. В общем, процесс кондиционирования заключается в следующем: воздух, подаваемый в ограниченную зону помещения, в которой предусмотрено пребывание людей, подвергают тепловлажностной обработке в системе кондиционирования и подают в нижнюю часть зоны в режиме, обеспечивающем ламинарный поток. Проходя вдоль нижних ограждающих поверхностей, воздух частично нагревается и за счет архимедовых сил постепенно переходит в верхнюю часть зоны. Основной поток достигает ограждающей противоположной поверхности зоны, изменяет свое направление на обратное и поступает к вытяжному устройству, расположенному в верхней части зоны, образуя второй противоположный поток. При этом в самой зоне создается интенсивный ламинарный режим свободно конвективных потоков, а в приграничной области соприкосновения сред в верхней части данной зоны – ламинарный режим. Режимы, протекающие в ограниченной зоне помещения, обеспечиваются за счет расчетного распределения скоростей воздуха в самой зоне. Требуемый перепад температуры в кондиционируемой зоне обеспечивается благодаря расчету температуры и расхода воздуха, подаваемого в зону с учетом источников тепловыделения. Расчетные режимы движения потоков кондиционированного воздуха позволяют уменьшить интенсивность теплообмена с ограждающими поверхностями и приграничной областью соприкосновения сред различных зон. Схема для осуществления предложенного способа кондиционирования воздуха в жилом помещении (спальня, гостиная и т. п.) представлена на рис. 1.

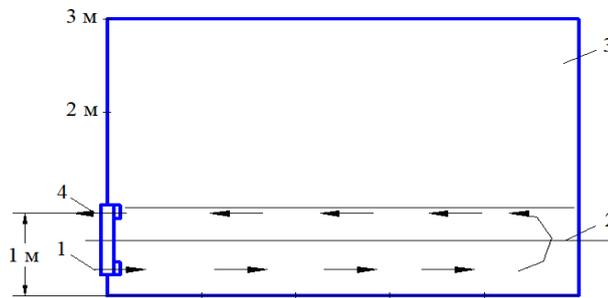


Рис. 1. Схема системы кондиционирования жилого помещения с использованием ламинарных потоков воздуха: 1 – устройство подачи обработанного воздуха; 2 – ограниченная зона подачи обработанного воздуха; 3 – охлаждаемое помещение; 4 – вытяжное устройство

Fig. 1. The diagram of the air conditioning system of the dwelling with the use of laminar air flows: 1 – device for treated air supplying; 2 – limited area for treated air supplying; 3 – cooled room; 4 – exhaust device

Пример реализации предлагаемого способа

Принимаем исходные данные для расчета в соответствии с требованиями [14–16]:

1) для условий Казахстана (г. Алматы), где многие предприятия Беларуси проектируют и строят здания: температура наружного воздуха $t_n = 31,5$ °С, расчетная температура воздуха в зоне помещения $t_p = 25$ °С, температура подаваемого воздуха в помещение $t_o = 20$ °С;

2) движение воздушных потоков близко к интенсивному ламинарному режиму ($Re = 2000–3000$);

3) теплообмен на границе холодного и теплого потоков при ламинарном режиме происходит за счет теплопроводности;

4) вдоль пола и стен в холодной зоне движение потоков вынужденное в ламинарном режиме.

Расчет производится для кондиционирования спальных мест в жилой комнате.

Учитывая обычное расположение конвекторов не выше уровня подоконника и высоту спальных мест над уровнем пола, для ориентировочного расчета примем высоту холодного слоя 1 м в жилой комнате размера 3×5 м. Тогда в холодной зоне должно образоваться два слоя воздуха, движущихся навстречу друг друга, толщиной примерно по $\Delta h = 0,5$ м.

1. Исходя из допустимого перепада температур $\Delta t = t_p - t_o = 25 - 20 = 5$ °С и среднего значения критерия Рейнольдса $Re = 2500$, определим часовой расход воздуха в холодной зоне и количество холода, переносимого этим воздухом. Для данных условий из критерия Рейнольдса Re

$$v = \frac{vRe}{d}, \quad (2)$$

где v – скорость воздушного потока, м²/с; v – коэффициент кинематической вязкости, $v = 1,6 \cdot 10^{-5}$ м²/с; d – толщина слоя, $d = \Delta h = 0,5$ м.

Тогда средняя скорость воздуха в кондиционированном слое

$$v = \frac{1,6 \cdot 10^{-5} \cdot 2500}{0,5} = 0,08 \text{ м/с.} \quad (3)$$

Расход воздуха

$$Q = 0,5 \cdot 3,0 \cdot 0,08 = 0,12 \text{ м}^3/\text{с} = 432 \text{ м}^3/\text{ч.} \quad (4)$$

Переносимое количество холода

$$q = C_p \rho Q \Delta t = 1,005 \cdot 1,2 \cdot 432 \cdot 5 = 2605,0 \text{ кДж/ч.} \quad (5)$$

где C_p – удельная теплоемкость, $C_p = 1,005 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{°C)}$; ρ – плотность воздуха, $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Для расчета конвективного теплообмена холодного воздуха с полом и боковыми стенками определим среднее значение коэффициента конвективного теплообмена α_k по формуле для вынужденной конвекции [6], приняв при этом температуру поверхности пола и стен в стационарном режиме $t_{ст} = 29 \text{ °C}$, а среднюю расчетную температуру воздуха 22 °C . Тогда

$$\alpha_k = 3,38 \sqrt{v/l} = 3,38 \sqrt{0,08/5} = 0,43 \text{ ккал/(ч}\cdot\text{м}^2\cdot\text{°C)} = 1,8 \text{ кДж/(ч}\cdot\text{м}^2\cdot\text{°C)}, \quad (6)$$

где l – длина помещения, м.

Количество холода, затрачиваемого при контакте с полом и стенами, составит

$$q_{п+ст} = \alpha_k S \Delta t = 1,8 \cdot (3 \cdot 5 + 1 \cdot 5 \cdot 2 + 3 \cdot 1) \cdot (29 - 22) = 352,8 \text{ кДж/ч.} \quad (7)$$

Расчет теплообмена между горячей и холодной зонами через верхнюю границу холодной зоны, исходя из учета процесса теплопроводности, производим с использованием решения задачи теплопередачи в полуограниченном теле [17]. Используем формулу

$$q_b = 2S \sqrt{\lambda C_p \rho / \pi} (t_g - t_x) / 2\sqrt{r}, \quad (8)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, $0,023 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ($\text{Дж/(с}\cdot\text{м}\cdot\text{°C)}$); t_g – температура воздуха в горячей зоне, $t_g = 31,5 \text{ °C}$; t_x – температура воздуха в холодной зоне, $t_x = 22 \text{ °C}$; r – время прогрева холодного слоя при его движении между противоположными ограждениями помещения, что составляет $r = l/v = 5/0,08 = 62,5 \text{ с} = 0,017 \text{ ч}$.

Тогда теплоступления за один проход воздуха

$$\Delta q_b = 2 \cdot 15 \cdot \sqrt{0,023 \cdot 1,005 \cdot 10^3 \cdot 1,2 / 3,14} (31,5 - 22) / 2\sqrt{62,5} = 3,35 \text{ кДж.} \quad (9)$$

Количество проходов воздуха за 1 ч $n = 1/0,017 = 59 \text{ 1/ч}$. Часовой приток теплоты в холодную зону через верхнюю границу $q_b = \Delta q_b n = 3,35 \cdot 59 = 197,65 \text{ кДж/ч}$. Приток горячего воздуха из горячей зоны в холодную

примем для ламинарного режима равным 10 % от расхода воздуха в холодном слое, т. е. 43,2 м³/ч. Тогда расход холода на охлаждение притекающего воздуха

$$q_{об} = C_p \rho (t_r - t_x) \Delta Q = 1,005 \cdot 1,2 \cdot (31,5 - 22) \cdot 43,2 = 495,0 \text{ кДж/ч.} \quad (10)$$

Итого, общий приток теплоты $\Sigma q = 352,8 + 197,65 + 495,0 = 1045,5$ кДж/ч. С учетом тепловыделения двух человек в режиме отдыха по 418,68 кДж/ч $\Sigma q = 1045,5 + 837,36 = 1882,9$ кДж/ч, что позволяет уменьшить перепад температур воздуха на выходе из устройства подачи обработанного воздуха примерно на 1 °С (увеличить на выходе – с 20 до 21 °С) или уменьшить расход воздуха до 320 м³/ч. При сохранении расчетных условий кондиционирования можно обеспечить трех или даже четырех человек допустимыми условиями отдыха (ГОСТ 30494–2011).

Данный расчет показывает преимущество локального кондиционирования помещения по отношению к кондиционированию всего помещения, на которое холодильные нагрузки составляют около 1,7–2,6 кВт [18], тогда как по предлагаемому способу – 0,53 кВт. При этом не учитывается возможность прогрева воздуха помещения через окна, которые необходимо прикрывать наружными жалюзи.

Для сравнения с предлагаемым способом произведен ориентировочный (точная методика такого расчета отсутствует) расчет расхода холода для кондиционирования воздуха в сравниваемой зоне с помощью кондиционера при тех же условиях, что и в приведенном выше примере, но при турбулентных воздушных потоках.

Для сохранения прежних условий кондиционирования в нижней зоне размерами в вертикальной плоскости 5×1 м располагаем ось выхода холодной плоской струи из кондиционера со скоростью $v = 5$ м/с на высоте 1 м от пола и определяем угол выпуска β холодной струи, при котором ось потока достигает противоположной вертикальной поверхности (стены) хотя бы на уровне пола (рис. 2).

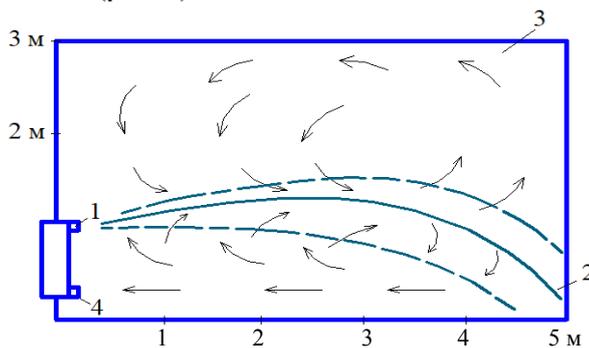


Рис. 2. Схема системы кондиционирования помещения с использованием турбулентных потоков воздуха: 1 – устройство подачи обработанного воздуха; 2 – ограниченная зона подачи обработанного воздуха вдоль оси выхода холодной плоской струи; 3 – охлаждаемое помещение; 4 – вытяжное устройство

Fig. 2. The diagram of air conditioning system of the premises with the use of turbulent air flows: 1 – feeder of the processed air; 2 – restricted area of flow of the treated air along the axis of the outlet cold flat jet; 3 – cooled room; 4 – exhaust device

Для этих условий выхода холодной струи критерий Рейнольдса

$$Re = 2b_0v/v = 2 \cdot 0,05 \cdot 5/(14,8 \cdot 10^{-6}) = 3,4 \cdot 10^4. \quad (11)$$

При наличии перепада температур струя в зависимости от условий движения и температурных полей отклоняется, что можно учесть через величину критерия Архимеда [19, с. 189]

$$Ar_x = (n/m^2)Ar_0(x/b_0)^{3/2}, \quad (12)$$

где n , m – коэффициенты затухания, равные для плоской струи 2,0 и 2,5 [19, с. 182]; Ar_0 – критерий Архимеда в начальном сечении,

$$Ar_0 = 19,62 \cdot (\Delta t_0 b_0 / v_0^2 T_{окр}); \quad (13)$$

Δt_0 – перепад температур между температурами на выходе струи из сопла (17 °С) и окружающей средой ($T_{окр} = 30$ °С или 27 °С); v_0 – скорость выхода струи, равная примерно 5 м/с; b_0 – ширина щели, из которой выходит холодный воздух, $b_0 = 0,05$ м.

После подстановки всех численных значений получим критерии Архимеда на разных расстояниях от выпускного отверстия, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Значения критерия Архимеда на разных расстояниях от выпускного отверстия

Archimedes number values at different distances from the outlet

x , м	1	2	3	4	5
Ar_x	0,037	0,105	0,193	0,296	0,420

Скорость потока выходящего из кондиционера холодного воздуха определяем из формулы

$$v_x = \frac{vm}{\sqrt{x/b_0}}. \quad (14)$$

Значения v_x на различном расстоянии от выпускного отверстия представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения скорости потока выходящего из кондиционера холодного воздуха на различном расстоянии от выпускного отверстия

The values of the flow rate of the cold air leaving the air conditioner at a different distance from the outlet

x , м	1	2	3	4	5
v_x , м/с	2,80	1,96	1,60	1,40	1,25

При $Ar_x > 0,15$ плоские струи уже заметно отклоняются под действием гравитационных сил от прямолинейного движения. Для определения зоны начала заметного отклонения холодной струи на рис. 3 показаны значе-

ния $v = f(x)$ (кривая 1), $Ar_x = f(x)$ (кривая 2) и $Ar = 0,15$ (линия 3). Как видно из приведенных кривых, на расстоянии около 2,5 м от кондиционера поток холодного воздуха начинает заметно отклоняться вниз.

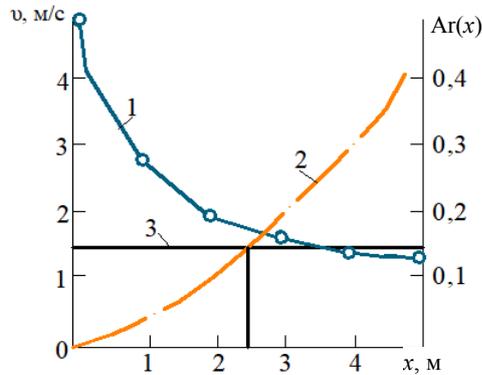


Рис. 3. Изменение критерия Архимеда и скорости потока выходящего из кондиционера холодного воздуха на разных расстояниях от выпускного отверстия

Fig. 3. Changing the Archimedes number and the flow rate of the cold air leaving the air conditioner at different distances from the outlet

Искривление оси охлажденной струи определяем по формуле [1]

$$\bar{y} = \bar{S} \sin \theta_0 + 0,091 Ar_0 \sqrt{T_0 / T_{\text{окр}}} (\bar{S})^{5/2}, \quad (15)$$

где $\bar{y} = y \cdot 2 / b_0$, $\bar{S} = \bar{x} \cdot 2 / b_0$ – для рассматриваемого случая, при использовании прежних условных обозначений для b_0 и x ; y – расстояние от оси выпускаемого холодного потока воздуха по вертикали; T_0 – температура воздушного потока на выходе струи из кондиционера, К; θ_0 – угол между осью выпуска струи и горизонтальной поверхностью.

Однако эта формула получена для нагретой по сравнению с окружающей средой свободной воздушной струи. Для охлажденной струи формула примет вид

$$\bar{y} = -\bar{S} \sin \theta + 0,091 Ar_0 \sqrt{T_{\text{окр}} / T_0} (\bar{S})^{5/2}. \quad (16)$$

В результате расчета при $\theta = 0$, т. е. в случае совпадения оси выпуска струи с горизонтальной поверхностью, получены данные, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

x, м	1	2	3	4	5
\bar{y} , м	0,03	0,17	0,47	0,97	1,70

Учитывая, что уровень расположения оси выпуска холодной струи над полом равен $\bar{y}_0 = 1$ м для доставки холодного воздуха хотя бы в противоположный угол ($x = 5$ м, $y = 0$), т. е. кондиционирования выбранной зоны (рис. 2), ось выпуска холодной струи необходимо направить вверх под углом

$$\beta = \arctg 0,7/5,0 = \arctg 0,14 = 8^\circ. \quad (17)$$

Если учесть кривизну оси холодного потока от места выпуска до противоположного угла, то его длина уже будет не 5 м, а почти 6 м. Однако в данном расчете по методике, разработанной для свободной плоской струи, необходимо учитывать стеснение струи на последнем участке перед стеной. Поэтому в качестве расчетного участка холодной струи следует принять первые 5 м от места выхода струи из кондиционера.

Как показывают расчеты полей температур, основанные на рекомендациях литературных источников и аналогии распределения скоростей и температур в поперечном сечении струи с учетом различных значений $T_{\text{окр}}$ для нижней ($T_{\text{окр}} = 27^\circ\text{C}$) и верхней зон ($T_{\text{окр}} = 33^\circ\text{C}$) (рис. 4), на 5 м движения охлажденной струи перепад температур уменьшается до (2–3) $^\circ\text{C}$, а поле температур значительно выравнивается. При этом объем присоединенных масс воздуха достигает 3–4-кратного значения, выходящего из кондиционера ($Q = 500 \text{ м}^3/\text{ч}$), т. е. в целом достигает 2000–2500 $\text{м}^3/\text{ч}$.

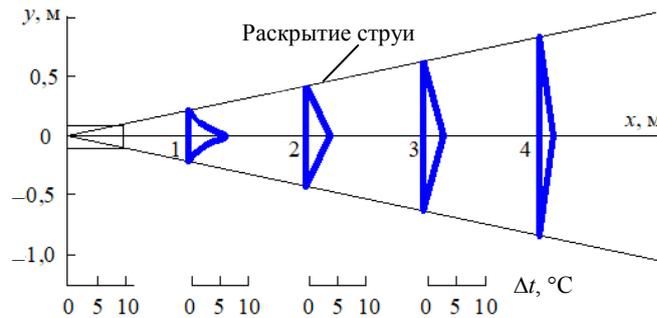


Рис. 4. Схема расширения турбулентной струи и изменения полей скоростей при удалении от выпуска на расстояние x

Fig. 4. The diagram of expansion of the turbulent jet and changes in velocity fields when receding at a distance x from the outlet

Считаем, что присоединение масс воздуха из окружающего пространства происходит примерно симметрично, т. е. из нижней и верхней зон – по 1000 $\text{м}^3/\text{ч}$. Тогда потери холода, уходящего вместе с воздухом в силу закона неразрывности потока, с учетом поля температур составляют 30 %. В нижнюю зону попадает около 60 % холода и 60 % воздуха (примерно 1500 $\text{м}^3/\text{ч}$).

Общее количество холода, подаваемого кондиционером в помещение, составит

$$q_0 = QC_{p,o}\Delta t, \quad (18)$$

где $C_{p,o}$ – объемная теплоемкость воздуха при постоянном давлении и t_0 .

Согласно справочным данным [20, с. 324], $C_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$; $\rho = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$ и $C_{p,o} = 1,005 \cdot 1,2 = 1,21 \text{ кДж}/(\text{м}^3\cdot^\circ\text{C})$. Тогда $q_0 = 500 \cdot 1,21 \cdot 10 = 6050 \text{ кДж}/\text{ч}$, из которых в верхнюю зону уходят не менее $6050 \cdot 40/100 = 2420 \text{ кДж}/\text{ч}$. В нижнюю зону выпадает около $6050 - 2420 = 3630 \text{ кДж}/\text{ч}$.

Определим среднее значение критерия Рейнольдса в нижней кондиционируемой зоне. При этом толщина возвратного потока, омывающая пол и нижние части стен с учетом средней толщины прямого потока с присоединенными массами, изменяется примерно от 0,05 (в дальнем углу) до 1,00 м (у кондиционера), а толщина прямого потока также изменяется в обратном порядке в этих же пределах. Расход воздуха в нижней зоне с учетом рециркуляции составляет около 1500 м³/ч. Средняя скорость потоков с учетом поперечных размеров половины зоны (1×3 м)/2 = 1,5 м² составит $v_{cp} = 1500/(1,5 \cdot 3600) = 0,28$ м/с. Тогда среднее значение критерия Рейнольдса в нижней зоне (с учетом температуры) – $Re = 2 \cdot 0,5 \times 0,28/(15,5 \cdot 10^{-6}) = 1,8 \cdot 10^4$, т. е. режим движения воздуха в нижней зоне явно турбулентный.

Исходя из средней скорости движения воздуха в нижней зоне, найдем потери холода при теплообмене воздуха с полом и боковыми стенами, приняв приведенную выше зависимость коэффициента конвективного теплообмена для случая ламинарного пограничного слоя, хотя при этом режим движения воздушного потока турбулентный. Тогда

$$\alpha_k = 3,38\sqrt{v/l} = 3,38\sqrt{0,28/5} = 0,80 \text{ ккал}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}) = 3,35 \text{ кДж}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}). \quad (19)$$

Количество холода, затрачиваемого при контакте с полом и стенами:

$$q_{п+ст} = \alpha_k S \Delta t = 3,35 \cdot (3 \cdot 5 + 1 \cdot 5 \cdot 2 + 3 \cdot 1) \cdot (29 - 22) = 656,6 \text{ кДж}/\text{ч}. \quad (20)$$

С учетом тепловыделения двух человек

$$\Sigma q = 2420 + 656,6 + 837,36 = 3914,0 \text{ кДж}/\text{ч}.$$

Сравнения затрат холода при кондиционировании одинаковой зоны в условиях ламинарного и турбулентного режимов вентиляции приведены в табл. 4.

Таблица 4

Режим	Вид тепlopоступления, кДж/ч			Всего с запасом 10 %
	из верхней зоны	от ограждающих конструкций	от людей	
Ламинарный	693	353	837	2071
Турбулентный	2420	657	837	4305

Следовательно, использование ламинарных режимов движения воздуха в кондиционированной зоне уменьшает теплопритоки от ограждающих конструкций и из верхней зоны примерно в два-три раза. Общий расход холода для кондиционирования воздуха по предлагаемому способу для зоны уменьшается ориентировочно в два раза.

Если кондиционировать все помещения, а не ограниченную зону, то расход холода увеличивается еще в полтора раза и достигнет нижних пределов, указанных Д. Крумом и Б. Робертсом.

Таким образом, предлагаемый способ кондиционирования воздуха повышает экономичность примерно в два раза за счет кондиционирования

локальной зоны помещения путем обеспечения такого режима движения противоточных потоков кондиционированного воздуха, при котором сохраняется ламинарный или интенсивно-ламинарный поток во всей кондиционированной зоне, что приводит к резкому уменьшению интенсивности теплообмена с ограждающими поверхностями и приграничной областью соприкосновения сред различных зон.

Большой интерес представляет работа В. Д. Акельева [21], в которой приведено обобщение процессов тепло- и массопереноса при свободной конвекции в пространствах, расположенных в замкнутых контурах. Показано [21, с. 27], что при свободной конвекции горизонтальных потоков воздуха в ламинарном режиме общие потери давления на трение при протяженности даже 12–15 м составляют менее 10^{-2} Па. Такие ничтожные перепады давления свидетельствуют о теоретической возможности достаточно устойчивого сочетания за счет гравитационной составляющей двух противоположно направленных ламинарных потоков воздуха.

Изложенные выше материалы относятся только к зонам отдыха небольшого количества людей без каких-либо дополнительных источников тепловыделений. Кроме этого, при наличии тепловыделяющих устройств типа современных телевизоров, видеопроекторов при мощности до 100 Вт использование для кондиционирования ламинарных воздушных слоев также достаточно энергоэффективно. При оценке условий кондиционирования воздуха в помещениях для работы людей на компьютерах с прочим офисным оборудованием и большой площадью светопрозрачных конструкций значительный интерес представляет статья [22]. Приведенные в ней величины теплопоступлений в помещения офисов позволяют констатировать, что при отсутствии теплопоступлений через заполнения светопрозрачного фасада также возможно эффективное использование слоевого кондиционирования воздуха. Для компенсации теплопоступлений через светопрозрачный фасад уже необходимо применение интенсивно-ламинарного режима.

ВЫВОДЫ

1. Противоточные ламинарные свободно конвективные потоки позволяют избавиться от необходимости перемешивания воздуха в разных зонах и сосредоточить выпуск и забор воздуха с одной стороны, обеспечив образование верхней некондиционированной зоны.

2. Интенсивно-ламинарный режим дает возможность по отношению к ламинарному обеспечивать максимально необходимую подвижность воздуха исходя из допустимых перепадов температуры в зоне кондиционирования, так как при ламинарном режиме из-за малых скоростей потоков и расходов воздуха в поперечном сечении зоны может не обеспечиваться необходимый температурный режим.

3. Ламинарный режим вблизи твердых ограждений и пограничный слой на них являются наиболее постоянными факторами и сохраняются на всей поверхности теплообмена между ограждениями и воздушными потоками, в результате чего обеспечивается минимальный нагрев воздуха в кондиционированной зоне.

4. Ламинарный режим в приграничной области соприкосновения сред различных зон обеспечивает теплоотдачу путем теплопроводности без влияния тепломассообмена за счет турбулентной диффузии.

5. Использование ламинарных режимов движения слоев кондиционированного воздуха в зонах длительного пребывания людей в помещениях позволяет существенно экономить расход электроэнергии на кондиционирование.

ЛИТЕРАТУРА

1. Батурин, В. В. Основы промышленной вентиляции / В. В. Батурин. 3-е изд., доп. М.: Профиздат, 1965. 608 с.
2. Bakke, P. Turbulent Diffusion of a Buoyant Layer at a Wall / P. Bakke, S. J. Leach / Applied Scientific Research. Vol. 15, No 1. Munich, 1965. P. 97–136.
3. Нетюхайло, А. П. Исследования устойчивости и кинематической структуры течений разноплотностных жидкостей / А. П. Нетюхайло // Харьк. ин-т ж.-д. транспорта имени С. М. Кирова. Харьков, 1969. 20 с.
4. Осипов, С. Н. О концентрациях метана в изотермических условиях непрветриваемых горизонтальных тупиковых выработок / С. Н. Осипов, И. И. Зинченко / Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1971. № 5. С. 117–125.
5. Чельшев, А. И. Исследование закономерности изменения температуры воздуха по высоте вентилируемого производственного помещения с избытками тепла / А. И. Чельшев. М.: Моск. инж.-строит. ин-т имени В. В. Куйбышева, 1977. 20 с.
6. Богословский, В. Н. Строительная теплофизика. Теплофизические основы отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / В. Н. Богословский. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1982. 415 с.
7. Способ кондиционирования воздуха в многозональной двухканальной системе: а. с. SU № 793074 М.кл. F24F3/00,7 / А. Я. Креслинь, Э. Э. Дзелзитис, М. Н. Шуев. Опубл. 30.01.1982.
8. Способ распределения воздуха в помещении: а. с. SU № 1692235 A1, F24F5/00,7/00 / С. Н. Осипов [и др.]. Опубл. 07.12.1988.
9. Способ распределения воздуха в помещении: а. с. SU № 1786340 A1, F24F7/00 / С. Н. Осипов [и др.]. Опубл. 06.02.1991.
10. Способ распределения воздуха в помещении: а. с. SU № 1812860 A2, F24F5/00,7/00 / С. Н. Осипов [и др.]. Опубл. 09.04.1990.
11. Способ распределения воздуха в помещении: Евраз. пат. № 011697 / С. Н. Осипов. Опубл. 28.04.2009.
12. Нестеренко, А. В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха / А. В. Нестеренко. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1971. 459 с.
13. Колпаков, Г. В. Регулирование микроклимата в условиях летнего перегрева зданий: радиационное охлаждение / Г. В. Колпаков. М.: Стройиздат, 1970. 175 с.
14. Отопление, вентиляция и кондиционирование: СНиП РК 4.02-42–2006. Введ.: 06.01.2007. 54 с.
15. Строительная климатология: СНиП РК 2.04.01–2010. Введ.: 29.12.2010. 45 с.
16. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях: ГОСТ 30494–2011. Введ.: 12.07.2012. М.: Стандартинформ, 2013. 23 с.
17. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1976. 351 с.
18. Крум, Д. Ж. Кондиционирование воздуха и вентиляция зданий / Д. Ж. Крум, Б. М. Робертс; пер. с англ. Е. Е. Карписа, М. Л. Сосина. М.: Стройиздат, 1980. 399 с.
19. Справочник проектировщика / В. Н. Богословский [и др.] / под ред. И. Г. Старовойрова. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1977. Ч. 2: Вентиляция и кондиционирование воздуха. 502 с.
20. Мартыненко, О. Г. Свободно-конвективный теплообмен / О. Г. Мартыненко, Ю. А. Соколовишин. Минск: Наука и техника, 1982. 398 с.
21. Акельев, В. Д. Тепло- и массообмен в ограниченных пространствах строительных конструкций и сооружений / В. Д. Акельев. Минск: БНТУ, 2010. 316 с.
22. Борухова, Л. В. Определение воздухообмена в помещениях общественных зданий с большой площадью светопрозрачных конструкций / Л. В. Борухова, А. С. Шибeko // Наука и техника. 2017. Т. 16. № 2. С. 125–130. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-125-130>.

REFERENCES

1. Baturin V. V. (1965) *Fundamentals of Industrial Ventilation*, 3rd ed. Moscow, Profizdat Publ. 608 (in Russian).
2. Bakke P., Leach S. J. (1965) Turbulent Diffusion of a Buoyant Layer at a Wall. *Applied Scientific Research*, 15 (1), 97–136. <https://doi.org/10.1007/bf00411550>.
3. Netyukhailo A. P. (1969) *Studies of Stability and Kinematic Structure of Flows of Different-Density Liquids*. Kharkiv, Kharkiv Institute of Railway Transport named after S. M. Kirov. 20 (in Russian).
4. Osipov S. N., Zinchenko I. I. (1971) On Methane Concentrations in Isothermal Conditions of Unventilated Horizontal Dead-End Elaborations. *Journal of Mining Science*, 7 (5), 589–596. <https://doi.org/10.1007/bf02501077>.
5. Chelyshev A. I. (1977) *Study of the Regularity of Air Temperature Changes in Accordance with the Height of Ventilated Production Premises with Excess Heat*. Moscow, Moscow Institute of Civil Engineering named after V. V. Kuibyshev (MISI). 20 (in Russian).
6. Bogoslovskii V. N. (1982) *Construction Thermophysics: Thermophysical Fundamentals of Heating, Ventilation and Air Conditioning*. 2nd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 415 (in Russian).
7. Kreslin' A. Ya., Dzelzitis E. E., Shuev M. N. (1982) *Air Conditioning Method in Multispectral Two-Channel System*. Author's Certificate USSR No 793074 (in Russian).
8. Osipov S. N., Staroverov V. M., Klenovskii A. I., Abdusaidov A. A. (1988) *Method of Air Distribution in the Room*. Author's Certificate USSR No 1692235 (in Russian).
9. Osipov S. N., Staroverov V. M., Klenovskii A. I., Abdusaidov A. A. (1991) *Method of Air Distribution in the Room*. Author's Certificate USSR No SU 1786340 A1 (in Russian).
10. Osipov S. N. [et al.]. *Method of Air Distribution in the Room: SU Author's Certificate No 1812860 A2, F24F5/00, 7/00 / Published 09.04.1990* (in Russian).
11. Osipov S. N. (2009) *Method of Air Distribution in the Room*. Eurasia Patent No 011697 (in Russian).
12. Nesterenko A. V. (1971) *Fundamentals of Thermodynamic Calculations of Ventilation and Air Conditioning*. 3rd ed. Moscow, Vysshaya Shkola Publ. 459 (in Russian).
13. Kolpakov G. V. (1970) Regulation of Microclimate in Conditions of Summer Overheating of Buildings: Radiation Cooling. Moscow, Stroizdat Publ. 175 (in Russian).
14. Construction Norms and Regulations of the Republic of Kazakhstan 4.02-42–2006. *Heating, Ventilation and Conditioning*. Astana, 2007. 54 (in Russian).
15. Construction Climatology: Construction Norms and Regulations of the Republic of Kazakhstan 2.04.01–2010. Introduced 01.03.2002. 45 (in Russian).
16. Stste Standart 30494–2011. *Residential and Public Buildings. The Parameters of the Microclimate in the Premises*. Moscow, Standartinform Publ., 2013. 23 (in Russian).
17. Pekhovich A. I., Zhidkikh V. M. (1976) *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. 2nd ed. Leningrad, Energiya Publ., Leningrad Branch. 351 (in Russian).
18. Croome D. J., Roberts B. M. (1975) *Airconditioning and Ventilation of Buildings*. Pergamon Press. 575.
19. Bogoslovskii V. N., Shepelev I. A., El'terman V. M., Barkalov B. V., Egiazarov A. G., Leskov E. A. (1977) *Handbook of the Designer. Part 2: Ventilation and Airconditioning*. 2nd ed. Moscow, Stroizdat Publ. 502 (in Russian).
20. Martynenko O. G., Sokovishin Yu. A. (1982) *Free-Convective Heat Transfer*. Minsk, Nauka i Tekhnika Publ. 398 (in Russian).
21. Akel'ev V. D. (2010) *Heat and Mass Transfer in Confined Spaces of Building Structures and Constructions*. Minsk, BNTU. 316 (in Russian).
22. Borukhava L. V., Shybeke A. S. (2017) Determination of Air Exchange in Public Building Premises Having Large Area of Translucent Structures. *Nauka i Tekhnika = Science & Technique*, 16 (2), 125–130 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2017-16-2-125-130>.

Received: 4 October 2018

Accepted: 8 January 2019

Published online: 31 July 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>

УДК 662.765.1

Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации

Е. М. Кашин¹⁾, В. Н. Диденко¹⁾

¹⁾Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова (Ижевск, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В статье излагается новый метод определения состава древесного генераторного газа, получаемого в газогенераторах обращенного процесса газификации. Анализируются недостатки существующих расчетных методов, главным из которых является плохое согласование результатов расчетов с опытными данными. Обосновывается приоритет основных химических реакций, протекающих при газификации древесного топлива. Выделяются три активные зоны газификации: окислительно-восстановительная, восстановительная и зона взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива. Окислительно-восстановительная зона в общем случае состоит из двух подзон: в первой протекают реакции образования водяного газа, а вторая появляется при подаче в газогенератор избыточного воздуха. Предлагаемый метод расчета компонентов генераторного газа – это совокупность модифицированного балансового и добавленного методов расчета концентрации продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами. В модифицированном балансовом методе рассматриваются первичные процессы превращения древесины и влажного воздуха в компоненты генераторного газа в первой подзоне окислительно-восстановительной зоны. Модифицированный балансовый метод основан на уравнениях материального баланса углерода, водорода, кислорода, влаги, азота и теплового баланса системы. В добавленном методе определяются концентрации компонентов генераторного газа во второй подзоне окислительно-восстановительной зоны, а также в восстановительной зоне и зоне взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива. Совокупность этих двух методов позволяет расчетным путем с большой точностью определять выход генераторного газа, концентрации его компонентов, расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик газогенератора.

Ключевые слова: концентрация компонента газа, уравнение баланса углерода, уравнение баланса водорода, уравнение баланса кислорода, уравнение баланса влаги, константа равновесия химической реакции, гомогенная реакция, гетерогенная реакция

Для цитирования: Кашин, Е. М. Новый метод расчета состава древесного генераторного газа обращенного процесса газификации / Е. М. Кашин, В. Н. Диденко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361>

Адрес для переписки

Кашин Евгений Михайлович
Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова
ул. 7-я Подлесная, 32а,
426069, г. Ижевск, Российская Федерация
Тел.: +7 3412 77-60-55 доб. 8102
kawuh@ya.ru

Address for correspondence

Kashin Evgeny M.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University
32a 7 Podlesnaya str.
426069, Izhevsk, Russian Federation
Tel.: +7 3412 77-60-55 / 8102
kawuh@ya.ru

The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process

E. M. Kashin¹⁾, V. N. Didenko¹⁾

¹⁾Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russian Federation)

Abstract. The article presents a new method for determining the composition of wood generator gas produced in gas generators of the inverted gasification process. The shortcomings of the existing calculation methods are analyzed, the main of which is the insufficient harmonization of the calculation results with the experimental data. The authors substantiate the priority of the main chemical reactions occurring during gasification of wood fuel. There are three active zones of gasification, viz.: a redox zone, a reduction zone and a zone of interaction of gasification products with each other and with the carbon of the fuel. In general, a redox zone consists of two subzones: in the first one reactions of water gas formation occur, and the second one appears when excess air is supplied to the gas generator. The proposed method for calculating the components of the generator gas is a set of a modified balance method and an added method for calculating the concentrations of chemical reaction products by the equilibrium constants of these reactions in the active gasification zones with different temperatures. The modified balance method considers the primary processes of wood and moist air transformation into components of the generator gas in the first subzone of the redox zone. The modified balance method is based on the equations of material balance of carbon, hydrogen, oxygen, moisture, nitrogen and thermal balance of the system. The added method determines the concentrations of the components of the generator gas in the second subzone of the redox zone, as well as in the reduction zone and the zone of interaction of the gasification products with each other and with the fuel carbon. The combination of these two methods makes it possible to calculate with greater accuracy the output of the generator gas, the concentration of its components, fuel and air consumption, as well as a number of other characteristics of the gas generator.

Keywords: concentration of gas component, equation of carbon balance, equation of hydrogen balance, equation of oxygen balance, equation of water balance, balance constant of chemical reaction, homogeneous reaction, heterogeneous reaction

For citation: Kashin E. M., Didenko V. N. (2019) The New Method for Determining the Composition of Wood Gas Produced in Gas Generators of the Inverted Gasification Process. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 341–361. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-341-361> (in Russian)

Введение

Газогенератор обращенного процесса газификации по отношению к газогенератору прямой схемы обладает рядом преимуществ, главными из которых являются: работа на различных видах топлива, низкое содержание смол в продуктах газификации, загрузка топлива без остановки процесса газификации, сонаправленность центробежных сил и потока генераторного газа (для газогенераторов роторного типа [1]). Считается, что в газогенераторе обращенной схемы абсолютно все элементы топлива, включая влагу, участвуют в процессе образования газа. Для расчета состава газа обращенного процесса газификации используется общепринятый балансовый метод, основанный на составлении материального и теплового балансов по заданному составу топлива [2–5]. Метод имеет ряд недостатков:

- результаты расчетов плохо согласуются с опытными данными (табл. 1);
- полагается, что влага диссоциирует на водород и кислород, хотя температура в древесных газогенераторах намного ниже 2000 °С;

- не учитывается химическое взаимодействие продуктов газификации друг с другом и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива в других температурных областях реальной активной зоны газификации;
- в явном виде не учитывается коэффициент избытка воздуха;
- содержание метана в продуктах газификации не определяется и в окончательных расчетах задается величиной $\text{CH}_4 = 1,5 \%$;
- не учитывается влага воздуха, используемого в качестве газифицирующего агента;
- для широкого диапазона изменения температуры в зоне газификации константа равновесия химической реакции водяного газа принимается средним значением в интервале от 1,7 до 2,5.

Перечисленные недостатки балансового метода [2] делают актуальной разработку нового метода расчета состава древесного генераторного газа (табл. 1).

Таблица 1

Сухой состав генераторного газа (%) по расчетам методики Н. Г. Юдушкина [2], по опытным данным Д. Б. Гинзбурга [3] и В. А. Лямина [6]

Dry composition of the generator gas (%) calculated by Yudushkin's method [2], according to Ginzburg's experimental data [3] and Lyamin's data [6]

CO	CO ₂	H ₂	O ₂	CH ₄	N ₂
Н. Г. Юдушкин [2]. Топливо – береза, влажность $W = 28 \%$, $T = 1500 \text{ K}$, $K = 2,49$					
19,1	11,4	16,6	–	1,5	51,5
Д. Б. Гинзбург [3]. Топливо – береза, $W = 28 \%$					
27,5	7,6	11,4	0,4	1,9	50,8
В. А. Лямин [6]. Топливо – береза, $W = 15\text{--}20 \%$					
30,8	4,3	5,6	0,3	1,4	57,6

Основная часть

Разработан метод расчета состава генераторного газа, представляющий совокупность балансового метода [2], модифицированного авторами статьи, и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами.

Для разработки нового метода расчета состава древесного генераторного газа потребовалось установить приоритеты и границы температурных зон протекания химических реакций в газогенераторе.

Способность веществ химически взаимодействовать друг с другом при $T, P = \text{const}$ определяется величиной и знаком изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса)

$$\Delta G = \Delta H - T \Delta S,$$

где ΔH – изменение энтальпии (теплового эффекта) химической реакции; ΔS – изменение энтропии химической реакции.

Химическая реакция при условиях $T, P = \text{const}$ возможна, если $\Delta G < 0$. При $\Delta G = 0$ реакция находится в состоянии равновесия. При $\Delta G > 0$ химическая реакция невозможна. Чем больше по модулю отрицательная величина ΔG , тем больше реакционная способность веществ, и доля реакции в системе химических превращений.

Доля i -й реакции в системе химических превращений определяется отношением

$$\omega_i = \frac{\Delta G_i}{\sum \Delta G}$$

В случаях, когда $\Delta G > 0$ и химическая реакция невозможна, значение ΔG_i и доля реакции ω_{pi} принимаются равными 0.

Величины ΔH_{pi} , ΔS_{pi} , ΔG_i и ω_i для i -х реакций, полученные по значениям изменений энтальпии и энтропии реагентов и продуктов реакций [7], приведены в табл. 2.

В предлагаемом методе, в отличие от существующего, выделяются не одна, а три активные зоны газификации (рис. 1, табл. 2):

1 – окислительно-восстановительная зона (ОВЗ), состоящая в общем случае из двух подзон (1.0 и 1.1). В подзоне 1.0 (БОВП) протекают реакции образования водяного газа. Температура в окислительно-восстановительной зоне в зависимости от теплоизоляции газогенератора составляет 60–85 % от адиабатной температуры горения топлива. При подаче в газогенератор избыточного воздуха ($\alpha > 1$) появляется подзона 1.1 (ПДО), где идут дополнительные окислительные реакции;

2 – восстановительная зона (ВЗ), где отсутствует окислитель и протекают только восстановительные реакции. По величине ΔG этих химических реакций получено, что температура в восстановительной зоне выше 980 °С;

3 – зона взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом топлива (ЗВП). По величине ΔG химических реакций, приведенных в табл. 2, получено, что температура в этой зоне ниже 980 °С.

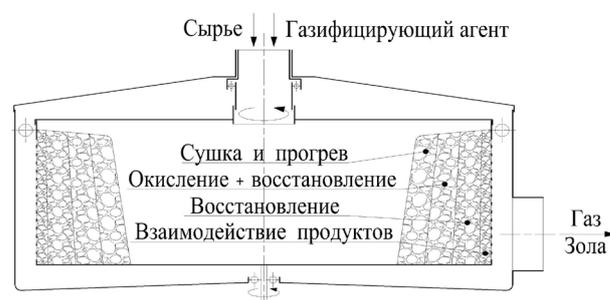


Рис. 1. Структура активной зоны газификации в газогенераторе роторного типа при центральной подаче газифицирующего агента (обращенная схема газификации)

Fig. 1. The structure of the gasification zone in rotary gas generator at the central supply of the gasifying agent (reversed gasification scheme)

Таблица 2

Приоритет химических реакций в различных температурных зонах газогенератора
The priority of chemical reactions in different temperature zones of the gas generator

№ реакции в активной зоне	Реакция	ΔH_{pi} , кДж/моль	ΔS_{pi} , Дж/(моль·К)	T, К	ΔG_i , Дж/моль	$\Sigma \Delta G$, Дж/моль	ω_i , доли ед.
1. Окислительно-восстановительная зона							
1.0 Балансовая окислительно-восстановительная подзона							
0	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	41,17	41,94	1500	-21740	-21740	1
1.1. Подзона дополнительного окисления избыточным кислородом при $\alpha > 1$							
1	$\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$	-393,51	2,83	1500	-397755	-1446410	0,27
2	$2\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$	-221	178,29	1500	-488435		0,34
3	$2\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2$	-172,51	24,77	1500	-209665		0,14
4	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$	-483,68	-88,75	1500	-350555		0,24
2. Восстановительная зона							
1	$\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	41,17	41,94	1200	-9158	-95810	0,10
2	$\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$	172,51	175,46	1200	-38042		0,40
3	$\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$	131,34	133,52	1200	-28884		0,30
4	$\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$	90,17	91,58	1200	-19726		0,21
3. Зона взаимодействия продуктов между собой и с углеродом топлива							
1	$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41,17	-41,94	950	-1327	-5267	0,25
2	$\text{C} + 2\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4$	-74,85	-80,75	950	0		0,00
3	$\text{CO} + 3\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$	-206,19	-214,27	950	-2633,5		0,50
4	$\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$	-165,02	-172,33	950	-1306,5		0,25

Предложенный метод позволяет вычислить выход, концентрации компонентов генераторного газа, определить расход топлива и воздуха, а также ряд других характеристик работы газогенератора.

Генераторный газ в газогенераторе считается идеальным, поэтому объемное содержание компонентов в газе соответствует их мольному содержанию. Состав генераторного газа зависит от активной зоны и имеет следующий наиболее общий вид:

$$\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{N}_2 + \text{O}_2^{\text{изб}} = 100 \%,$$

где CO, CO₂, CH₄, H₂, H₂O, N₂, O₂^{изб} – процентное содержание соответствующих газов по объему.

В отличие от [2], состав газа включает O₂^{изб} и CH₄. Наличие в составе газа неизрасходованного кислорода O₂^{изб} возможно только на выходе из подзоны 1.0 (БОВП) окислительно-восстановительной зоны 1 при $\alpha > 1$. Метан CH₄ появляется только на выходе из зоны 3.

**Модифицированный балансовый метод
(материальный и тепловой балансы)**

Исходными составляющими материального баланса являются влажные топливо и воздух, а конечными – влажный генераторный газ, недожог и зола. В отличие от [2], в качестве газифицирующего агента рассматривается не сухой, а влажный воздух. Тепловой баланс составляется по низшей теплоте сгорания топлива, определяемой расчетным путем.

Элементарный состав твердого органического топлива (по рабочей массе)

$$C^p + H^p + O^p + N^p + S^p + W^p + A^p = 100 \%,$$

где $C^p, H^p, O^p, N^p, S^p, W^p, A^p$ – массовые процентные содержания элементов в исходном рабочем твердом топливе. Для древесного топлива $S^p \cong 0$.

Для удобства работы с малоразмерными коэффициентами уравнений расчет производится для 100 кмоль влажного генераторного газа.

Для определения выхода $v_{в.г}$ из 1 кг топлива, содержания компонентов генераторного газа CO, CO_2, H_2, H_2O, N_2 и избыточного кислорода O_2 в конце первой активной зоны требуется семь уравнений, составленных из материального и теплового балансов процесса газификации, учитывающих константу равновесия реакции образования водяного газа.

Переход элементов топлива (C^p, H^p, O^p, N^p, W^p) и воздуха (O_2^b, N_2^b , влага) в генераторный газ осуществляется по четырем основным уравнениям материального баланса углерода, водорода, кислорода и влаги.

Объем 100 кмоль генераторного газа при нормальных физических условиях ($t = 0 \text{ }^\circ\text{C}, P = 760 \text{ мм рт. ст.}$) по закону Авогадро

$$V_{в.г} = 100 \cdot 22,4 \text{ м}^3.$$

Масса рабочего топлива, кг, необходимая для получения $V_{в.г}$ газа:

$$G_t = \frac{V_{в.г}}{v_{в.г}} = \frac{100 \cdot 22,4}{v_{в.г}},$$

где $v_{в.г}$ – выход влажного газа из 1 кг топлива, $\text{м}^3/\text{кг}$.

Уравнение баланса углерода

Баланс углерода заключается в том, что количество углерода до и после химических реакций не изменяется. Количество углерода (кмоль), содержащегося в топливе массой G_t , определяется по уравнению

$$C_t^p = \frac{G_t C^p}{100 \mu_C} = \frac{100 \cdot 22,4 C^p}{v_{в.г} 100 \cdot 12} = \frac{1,867 C^p}{v_{в.г}},$$

где μ_C – молекулярная масса углерода.

В первой активной зоне углерод в количестве $C_{\text{д}}^{\text{P}}$ переходит в газообразные компоненты CO и CO₂

$$C_{\text{д}}^{\text{P}} = C^{\text{P}} (100 - \delta) / 100,$$

где $C_{\text{д}}^{\text{P}}$ – действительное процентное содержание углерода по рабочей массе, необходимое для образования 100 кмоль влажного генераторного газа; δ – потери углерода, связанные с образованием золы и шлака, %.

Тогда уравнение баланса углерода запишется в виде

$$\frac{1,867C_{\text{д}}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}} = \text{CO} + \text{CO}_2. \quad (1)$$

Уравнение баланса водорода

Весь водород H^{P} твердого топлива после химического взаимодействия превращается в водород генераторного газа (содержанием водорода в шлаке пренебрегается ввиду незначительности).

Количество водорода (кмоль) в массе $G_{\text{т}}$ рабочего топлива определяется по уравнению

$$\text{H}_{\text{т}}^{\text{P}} = \frac{G_{\text{т}} \text{H}^{\text{P}}}{100 \mu_{\text{H}_2}} = \frac{100 \cdot 22,4 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}} 100 \cdot 2} = \frac{11,2 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}},$$

где μ_{H_2} – молекулярная масса водорода.

Тогда уравнение баланса водорода запишется в следующем виде

$$\frac{11,2 \text{H}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}} = \text{H}_2. \quad (2)$$

Уравнение (2) отличается от [2] тем, что не включает водород от диссоциации паров воды на H₂ и O₂.

Уравнение баланса кислорода

Количество кислорода (кмоль) в рабочей массе топлива

$$\text{O}_{\text{т}}^{\text{P}} = \frac{G_{\text{т}} \text{O}^{\text{P}}}{100 \mu_{\text{O}_2}} = \frac{100 \cdot 22,4 \text{O}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}} 100 \cdot 32} = \frac{0,7 \text{O}^{\text{P}}}{\nu_{\text{в.г}}},$$

где μ_{O_2} – молекулярная масса кислорода.

Количество воздуха (кмоль), необходимое для сжигания рабочей массы топлива $G_{\text{т}}$ при коэффициенте избытка воздуха α :

$$v_B = \frac{M_B}{\mu_B} = \frac{G_T V_o \rho_B \alpha}{\mu_B} = \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{B,Г} \mu_B},$$

где M_B – масса воздуха, необходимая для сжигания G_T (кг) топлива при коэффициенте избытка воздуха α , кг; V_o – теоретический объем воздуха, необходимый для полного сжигания 1 кг рабочего топлива при $\alpha = 1$ м³/кг; ρ_B – плотность влажного воздуха при нормальных физических условиях, кг/м³; μ_B – кажущаяся молекулярная масса влажного воздуха, кг/моль;

$$\rho_B = \frac{B}{R_B T} - 0,0013 \frac{\varphi P_H}{T}; \quad \mu_B = 28,96 - 10,944 \frac{\varphi P_H}{B},$$

B – барометрическое давление, Па; φ – относительная влажность, доли ед.; P_H – давление насыщения водяного пара при температуре T , Па; R_B – удельная газовая постоянная сухого воздуха, Дж/(кг·К).

Давление насыщения водяного пара P_H при температуре T определяется по таблицам насыщенного водяного пара или по приближенной зависимости

$$P_H = 479 + (11,52 + 1,62(T - 273))^2.$$

Полагается, что объемная доля кислорода в воздухе равна 0,21, и уравнение баланса кислорода записывается в следующем виде:

$$\frac{0,7O^p}{v_{B,Г}} + 0,21v_B = CO_2 + 0,5(CO + H_2O) + 0,21v_B^{изб}, \quad (3)$$

где $0,21v_B$ – количество кислорода в подаваемом воздухе; $0,21v_B^{изб}$ – количество кислорода избыточного воздуха в составе продуктов газификации в окислительно-восстановительной зоне 1;

$$v_B^{изб} = \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \beta}{v_{B,Г} \mu_B}, \quad \beta = \begin{cases} 0 & \text{при } \alpha \leq 1; \\ (\alpha - 1) & \text{при } \alpha > 1. \end{cases}$$

В (3), в отличие от [2], в явном виде учтен коэффициент избытка воздуха α и отсутствует O_2 от диссоциации паров воды.

Уравнение баланса влаги

Количество влаги (кмоль), содержащейся в топливе массой G_T :

$$H_2O^p = \frac{100 \cdot 22,4 W^p}{v_{B,Г} 100 \cdot 18} = \frac{1,244 W^p}{v_{B,Г}}.$$

Количество влаги (кмоль), содержащейся в подаваемом воздухе:

$$v_{H_2O}^B = \frac{M_{H_2O}}{\mu_{H_2O}},$$

где M_{H_2O} – масса водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, кг; μ_{H_2O} – молекулярная масса воды, кг/моль.

Масса водяного пара в воздухе определяется по известному влаго-содержанию воздуха d

$$M_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{d}{1+d} \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}}}$$

Тогда количество влаги (кмоль), содержащейся в воздухе:

$$v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в}} = \frac{d}{1+d} \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}} \mu_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Окончательно уравнение баланса влаги запишется следующим образом:

$$\frac{1,244 W^{\text{п}}}{v_{\text{в.г}}} + v_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{в}} = \text{H}_2\text{O}. \quad (4)$$

В (4), в отличие от [2], учтено влагосодержание подаваемого воздуха.

Так как диссоциация водяного пара на водород и кислород возможна только при температурах выше 2000°C , недостижимых для древесных газогенераторов, то вся влага топлива и влажного воздуха полностью переходит в водяной пар генераторного газа.

Уравнение баланса азота

Замыкающим уравнением материального баланса является уравнение баланса азота

$$100 - (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2^{\text{изб}}) = \text{N}_2^{\text{г}}.$$

Количество азота до и после процессов горения и газификации остается практически неизменным, так как азот не участвует в химических реакциях, поэтому количество азота в генераторном газе $\text{N}_2^{\text{г}}$ принимается равным количеству азота в воздухе $\text{N}_2^{\text{в}}$ [8, 9]

$$\text{N}_2^{\text{г}} \cong \text{N}_2^{\text{в}} = 0,79 v_{\text{в}} = 0,79 \cdot \frac{100 \cdot 22,4 V_o \rho_B \alpha}{v_{\text{в.г}} \mu_{\text{в}}}$$

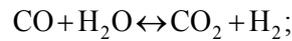
Принимается, что объемная доля азота в воздухе составляет 0,79.

И окончательно уравнение баланса азота запишется в виде

$$100 - (\text{CO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2 + \text{H}_2\text{O} + 0,21 v_{\text{в}}^{\text{изб}}) = 0,79 v_{\text{в}}. \quad (5)$$

Уравнения теплового баланса

Содержание CO , H_2O , CO_2 и H_2 в окислительно-восстановительной зоне 1 зависит от температуры и определяется константой равновесия химической реакции образования водяного газа:



$$K_v = \frac{\text{CO} \cdot \text{H}_2\text{O}}{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2}. \quad (6)$$

По результатам исследований [4, 10–13] константу равновесия химической реакции можно найти по уравнению

$$\lg K_v = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098.$$

Вторым уравнением теплового баланса является уравнение теплоты процесса газификации. Из определения условного КПД газогенератора следует

$$\eta_{\Gamma} = \frac{v_{\text{в.г}} Q_{\text{H}}^{\text{Б.Г}}}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}},$$

где $v_{\text{в.г}}$ – выход влажного газа из 1 кг топлива, м³/кг; Q_{H}^{P} – низшая теплота сгорания рабочей массы газифицируемого твердого топлива; $Q_{\text{H}}^{\text{Б.Г}}$ – низшая теплота сгорания влажного газа, кДж/м³, определяемая по известной зависимости

$$Q_{\text{H}}^{\text{Б.Г}} = 127,7\text{CO} + 107,6\text{H}_2 + 356,7\text{CH}_4.$$

Поскольку метан в окислительно-восстановительной зоне 1 не образуется из-за высоких температур, уравнение теплового баланса запишется в виде

$$\frac{Q_{\text{H}}^{\text{P}} \eta_{\Gamma}}{v_{\text{в.г}}} = 127,7\text{CO} + 107,6\text{H}_2. \quad (7)$$

Низшая теплота сгорания рабочей массы газифицируемого твердого топлива, как и в [2, 5, 8–10], определялась в кДж/кг по формуле Д. И. Менделеева

$$Q_{\text{H}}^{\text{P}} = 340\text{C}^{\text{P}} + 1035\text{H}^{\text{P}} - 109(\text{O}^{\text{P}} - \text{S}^{\text{P}}) - 25\text{W}^{\text{P}}.$$

Таким образом, выход влажного газа из 1 кг рабочего топлива и состав генераторного газа на выходе из окислительно-восстановительной зоны 1 определяются из совместного решения уравнений (1)–(7).

Метод расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами

Обозначения (в соответствии с табл. 2): i, j – номер реакции и активной зоны; $j = 1$ соответствует окислительно-восстановительная зона 1 (ОВЗ); $j = 1.0$ – балансовая окислительно-восстановительная подзона 1.0 (БОВП),

рассматриваемая в модифицированном балансовом методе; $j = 1.1$ – подзона дополнительного окисления 1.1 (ПДО); $j = 2$ – восстановительная зона 2 (ВЗ); $j = 3$ – зона взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива 3 (ЗВП); X – общее обозначение компонента генераторного газа; $[X]_{ij}$ – конечная мольная доля компонента X , в % на 100 кмоль генераторного газа (далее – концентрация), создаваемая в результате протекания i -й реакции в j -й зоне; $(R_X)_{ij}$ – начальная мольная доля (далее – концентрация) компонента X , в % на 100 кмоль генераторного газа, для i -й реакции в j -й зоне; ω_{ij} – доля i -й реакции из системы химических превращений в j -й зоне, доли ед.; K_{ij} – константа равновесия i -й реакции в j -й зоне; $[X]_{\Sigma j}$ – мольная доля (далее – концентрация) компонента X , в % на 100 кмоль генераторного газа, создаваемая в результате протекания всех реакций в j -й зоне.

1. Окислительно-восстановительная зона 1

ОВЗ в общем случае состоит из двух подзон: балансовой окислительно-восстановительной подзоны 1.0 (БОВП) и подзоны дополнительного окисления 1.1 (ПДО), существующей только при $\alpha > 1$.

Изложенный выше модифицированный балансовый метод рассматривает процессы перехода элементов твердого топлива (древесины) и газифицирующего агента (влажного воздуха) в компоненты генераторного газа только в БОВП без учета дополнительного окисления углерода и образующихся горючих газов CO и H₂ в случае избыточного воздуха ($\alpha > 1$).

При $\alpha > 1$ в составе генераторного газа на выходе из подзоны 1.0 присутствует неизрасходованный кислород O₂^{изб}. В данной работе полагается, что этот неизрасходованный кислород является причиной дополнительных реакций окисления, локализованных в ПДО. Тогда с учетом наличия подзоны 1.1 конечная концентрация CO на выходе из ОВЗ в общем случае запишется как:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,1} = \begin{cases} [\text{CO}]_{0,1.0} & \text{при } \alpha \leq 1; \\ [\text{CO}]_{\Sigma,1.1} & \text{при } \alpha > 1. \end{cases} \quad (8)$$

Концентрации $[\text{CO}_2]_{\Sigma,1}$, $[\text{H}_2]_{\Sigma,1}$, $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1}$ определяются аналогично (8)

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,1} = 100 - ([\text{CO}]_{\Sigma,1} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} + [\text{H}_2]_{\Sigma,1} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1}).$$

1.1. Подзона дополнительного окисления избыточным кислородом при $\alpha > 1$

Реакция 1 ПДО: $\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2$.

Выражение константы равновесия химической реакции 1 и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,1,1} = \frac{[\text{CO}_2]_{1,1,1}}{[\text{O}_2]_{1,1,1}}; \quad (9)$$

$$\lg K_{1,1,1} = \frac{20582,8}{T} - 0,302 \lg T + 0,143 \cdot 10^{-3} T - 0,24 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,622;$$

$$[\text{CO}_2]_{1,1,1} = (R_{\text{CO}_2})_{1,1,1} + a; \quad [\text{O}_2]_{1,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{1,1,1} - a,$$

где a – количество O_2 , прореагировавшее в реакции 1 ПДО, в % от 100 кмоль газа [15].

Избыточный кислород в ПДО распределяется между четырьмя протекающими реакциями в соответствии с их приоритетом, т. е. пропорционально величине $\omega_{i,1,1}$. Тогда начальная концентрация O_2 для реакции 1 в ПДО

$$(R_{\text{O}_2})_{1,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{1,1,1}.$$

Начальная концентрация CO_2 для реакции 1 также берется с учетом доли этой реакции в системе химических превращений ПДО

$$(R_{\text{CO}_2})_{1,1,1} = [\text{CO}_2]_{0,1,0} \omega_{1,1,1}.$$

Результатом решения (9) является искомая величина a .

Реакция 2 ПДО: $2\text{C} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$.

Выражение константы равновесия химической реакции 2 и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,1,1} = \frac{[\text{CO}]_{2,1,1}^2}{[\text{O}_2]_{2,1,1}}; \quad (10)$$

$$\lg K_{2,1,1} = \frac{11635,1}{T} + 2,1656 \lg T - 0,94 \cdot 10^{-3} T - 0,876 \cdot 10^{-6} T^2 + 3,394;$$

$$[\text{CO}]_{2,1,1} = (R_{\text{CO}})_{2,1,1} + 2b; \quad [\text{O}_2]_{2,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{2,1,1} - b,$$

где b – количество O_2 , прореагировавшее в реакции 2 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{2,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{2,1,1}.$$

Начальная концентрация CO для реакции 2 также берется с учетом доли реакции 2 в системе химических превращений ПДО

$$(R_{\text{CO}})_{2,1,1} = [\text{CO}]_{0,1,0} \omega_{2,1,1}.$$

Результатом решения (10) является искомая величина b .

Реакция 3 ПДО: $2\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}_2$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,1,1} = \frac{[\text{CO}_2]_{3,1,1}^2}{[\text{CO}]_{3,1,1}^2 \cdot [\text{O}_2]_{3,1,1}}; \quad (11)$$

$$\lg K_{3,1,1} = \frac{29530,5}{T} - 2,769 \lg T + 1,225 \cdot 10^{-3} T - 0,1356 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,15;$$

$$[\text{CO}]_{3,1,1} = (R_{\text{CO}})_{3,1,1} - 2d; \quad [\text{O}_2]_{3,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{3,1,1} - d;$$

$$[\text{CO}_2]_{3,1,1} = (R_{\text{CO}_2})_{3,1,1} + 2d,$$

где d – количество O_2 , прореагировавшее в реакции 3 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{3,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}.$$

Начальные концентрации всех участвующих в реакции 3 компонентов газа также берутся с учетом доли реакции 3 в системе химических превращений ПДО:

$$(R_{\text{CO}})_{3,1,1} = [\text{CO}]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}; \quad (R_{\text{CO}_2})_{3,1,1} = [\text{CO}_2]_{0,1,0} \omega_{3,1,1}.$$

Результатом решения (11) является искомая величина d .

Реакция 4 ПДО: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{H}_2\text{O}$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,1,1} = \frac{[\text{H}_2\text{O}]_{4,1,1}^2}{[\text{H}_2]_{4,1,1}^2 \cdot [\text{O}_2]_{4,1,1}}; \quad (12)$$

$$\lg K_{4,1,1} = \frac{25116,1}{T} - 0,9466 \lg T - 7,216 \cdot 10^{-4} T + 1,618 \cdot 10^{-7} T^2 - 1,714;$$

$$[\text{H}_2]_{4,1,1} = (R_{\text{H}_2})_{4,1,1} - 2e; \quad [\text{O}_2]_{4,1,1} = (R_{\text{O}_2})_{4,1,1} - e; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{4,1,1} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,1,1} + 2e,$$

где e – количество O_2 , прореагировавшее в реакции 4 ПДО, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{O}_2})_{4,1,1} = [\text{O}_2]_{0,1,0} \omega_4; \quad (R_{\text{H}_2})_{4,1,1} = [\text{H}_2]_{0,1,0} \omega_4; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,1,1} = [\text{H}_2\text{O}]_{0,1,0} \omega_4.$$

Результатом решения (12) является искомая величина e .

Вычисление итоговой конечной концентрации CO на выходе из ПДО производится по следующей зависимости:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,1.1} = [\text{CO}]_{0,1.0} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{\text{CO}})_{i,1.1} + \sum_{i=1}^{i=4} [\text{CO}]_{i,1.1}.$$

Аналогично вычисляются $[\text{CO}_2]_{\Sigma,1.1}$, $[\text{H}_2]_{\Sigma,1.1}$ и $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1.1}$

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,1.1} = 100 - \left([\text{CO}]_{\Sigma,1.1} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,1.1} + [\text{H}_2]_{\Sigma,1.1} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1.1} \right).$$

2. Восстановительная зона

Реакция 1 ВЗ: $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,2} = \frac{[\text{CO}]_{1,2} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{1,2}}{[\text{CO}_2]_{1,2} \cdot [\text{H}_2]_{1,2}}; \quad (13)$$

$$\lg K_{1,2} = -\frac{2207,2}{T} + 0,9115 \lg T - 9,738 \cdot 10^{-4} T + 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 + 0,098;$$

$$[\text{CO}_2]_{1,2} = (R_{\text{CO}_2})_{1,2} - f; \quad [\text{H}_2]_{1,2} = (R_{\text{H}_2})_{1,2} - f;$$

$$[\text{CO}]_{1,2} = (R_{\text{CO}})_{1,2} + f; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{1,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{1,2} + f,$$

где f – количество H_2 , прореагировавшее в реакции 1 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15].

Начальные концентрации всех компонентов газа, участвующих в i -й реакции ВЗ, берутся на выходе из ОВЗ с учетом доли данной реакции в системе химических превращений ВЗ, т. е. пропорционально величине $\omega_{i,2}$:

$$(R_{\text{CO}_2})_{1,2} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}; \quad (R_{\text{H}_2})_{1,2} = [\text{H}_2]_{\Sigma,1} \omega_{1,2};$$

$$(R_{\text{CO}})_{1,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{1,2} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1} \omega_{1,2}.$$

Результатом решения (13) является искомая величина f .

Реакция 2 ВЗ: $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,2} = \frac{[\text{CO}]_{2,2}^2}{[\text{CO}_2]_{2,2}}; \quad (14)$$

$$\lg K_{2,2} = -\frac{8947,7}{T} + 2,4673 \lg T - 1,0824 \cdot 10^{-3} T + 0,116 \cdot 10^{-6} T^2 + 2,772;$$

$$[\text{CO}_2]_{2,2} = (R_{\text{CO}_2})_{2,2} - g; \quad [\text{CO}]_{2,2} = (R_{\text{CO}})_{2,2} + 2g,$$

где g – количество CO_2 , прореагировавшее в реакции 2 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{CO}_2})_{2,2} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,1} \omega_{2,2}; \quad (R_{\text{CO}})_{2,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{2,2}.$$

Результатом совместного решения (14) является искомая величина g .

Реакция 3 ВЗ: $\text{C} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + \text{H}_2$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,2} = \frac{[\text{CO}]_{3,2} \cdot [\text{H}_2]_{3,2}}{[\text{H}_2\text{O}]_{3,2}}; \quad (15)$$

$$\lg K_{3,2} = -\frac{6740,5}{T} + 1,5561 \lg T - 1,092 \cdot 10^{-4} T - 0,37 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,554;$$

$$\text{H}[\text{H}_2\text{O}]_{3,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{3,2} - h; \quad [\text{CO}]_{3,2} = (R_{\text{CO}})_{3,2} + h; \quad [\text{H}_2]_{3,2} = (R_{\text{H}_2})_{3,2} + h,$$

где h – количество H_2O , прореагировавшее в реакции 3 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{H}_2\text{O}})_{3,2} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}; \quad (R_{\text{CO}})_{3,2} = [\text{CO}]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}; \quad (R_{\text{H}_2})_{3,2} = [\text{H}_2]_{\Sigma,1} \omega_{3,2}.$$

Результатом решения (15) является искомая величина h .

Реакция 4 ВЗ: $\text{C} + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,2} = \frac{[\text{CO}_2]_{4,2} \cdot [\text{H}_2]_{4,2}^2}{[\text{H}_2\text{O}]_{4,2}^2}; \quad (16)$$

$$\lg K_{4,2} = -\frac{4533,3}{T} + 0,6446 \lg T + 8,616 \cdot 10^{-4} T - 1,858 \cdot 10^{-7} T^2 + 2,336;$$

$$[\text{H}_2\text{O}]_{4,2} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,2} - 2j; \quad [\text{CO}_2]_{4,2} = (R_{\text{CO}_2})_{4,2} + j; \quad [\text{H}_2]_{4,2} = (R_{\text{H}_2})_{4,2} + 2j,$$

где $2j$ – количество H_2O , прореагировавшее в реакции 4 ВЗ, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{H_2O})_{4,2} = [H_2O]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}; \quad (R_{CO_2})_{4,2} = [CO_2]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}; \quad (R_{H_2})_{4,2} = [H_2]_{\Sigma,1} \omega_{4,2}.$$

Результатом решения (16) является искомая величина j .

Для вычисления конечного значения компонента генераторного газа CO на выходе из восстановительной зоны использована следующая зависимость:

$$[CO]_{\Sigma,2} = [CO]_{\Sigma,1} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{CO})_{i,2} + \sum_{i=1}^{i=4} [CO]_{i,2}.$$

Аналогично вычисляются $[CO_2]_{\Sigma,2}$, $[H_2]_{\Sigma,2}$, $[H_2O]_{\Sigma,2}$

$$[N_2]_{\Sigma,2} = 100 - ([CO]_{\Sigma,2} + [CO_2]_{\Sigma,2} + [H_2]_{\Sigma,2} + [H_2O]_{\Sigma,2}).$$

3. Зона взаимодействия продуктов между собой и с углеродом топлива

Реакция 1 ЗВП: $CO + H_2O \leftrightarrow CO_2 + H_2$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{1,3} = \frac{[CO_2]_{1,3} \cdot [H_2]_{1,3}}{[CO]_{1,3} \cdot [H_2O]_{1,3}}; \tag{17}$$

$$\lg K_{1,3} = \frac{2207,2}{T} - 0,9115 \lg T + 9,738 \cdot 10^{-4} T - 1,487 \cdot 10^{-7} T^2 - 0,098;$$

$$[CO]_{1,3} = (R_{CO})_{1,3} - k; \quad [H_2O]_{1,3} = (R_{H_2O})_{1,3} - k;$$

$$[CO_2]_{1,3} = (R_{CO_2})_{1,3} + k; \quad [H_2]_{1,3} = (R_{H_2})_{1,3} + k,$$

где k – количество H_2O , прореагировавшее в реакции 1 ЗВП, выраженное в процентах от 100 кмоль генераторного газа [15].

Начальные концентрации всех компонентов i -й реакции ЗВП берутся на выходе из ВЗ с учетом доли данной реакции в системе химических превращений ЗВП, т. е. пропорционально величине $\omega_{i,3}$:

$$(R_{CO})_{1,3} = [CO]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}; \quad (R_{H_2O})_{1,3} = [H_2O]_{\Sigma,2} \omega_{1,3};$$

$$(R_{CO_2})_{1,3} = [CO_2]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}; \quad (R_{H_2})_{1,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{1,3}.$$

Результатом решения (17) является искомая величина k .

Реакция 2 ЗВП: $C + 2H_2 \leftrightarrow CH_4$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{2,3} = \frac{[CH_4]_{2,3}}{[H_2]_{2,3}^2}; \quad (18)$$

$$\lg K_{2,3} = \frac{3348}{T} - 5,57 \lg T + 0,186 \cdot 10^{-2} T - 1,095 \cdot 10^{-7} T^2 + 11,79;$$

$$[H_2]_{2,3} = (R_{H_2})_{2,3} - 2m; \quad [CH_4]_{2,3} = (R_{CH_4})_{2,3} + m,$$

где $2m$ – количество H_2 , прореагировавшее в реакции 2 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{H_2})_{2,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{2,3}; \quad (R_{CH_4})_{2,3} = [CH_4]_{\Sigma,2} \omega_{2,3}.$$

Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то $(R_{CH_4})_{2,3} = 0$.

Результатом решения (18) является искомая величина m .

Реакция 3 ЗВП: $CO + 3H_2 \leftrightarrow CH_4 + H_2O$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{3,3} = \frac{[CH_4]_{3,3} \cdot [H_2O]_{3,3}}{[CO]_{3,3} \cdot [H_2]_{3,3}^3}; \quad (19)$$

$$\lg K_{3,3} = \frac{9874}{T} - 7,14 \lg T + 0,188 \cdot 10^{-2} T - 0,094 \cdot 10^{-6} T^2 + 8,64;$$

$$[H_2]_{3,3} = (R_{H_2})_{3,3} - 3n; \quad [CO]_{3,3} = (R_{CO})_{3,3} - n;$$

$$[CH_4]_{3,3} = (R_{CH_4})_{3,3} + n; \quad [H_2O]_{3,3} = (R_{H_2O})_{3,3} + n,$$

где $3n$ – количество H_2 , прореагировавшее в реакции 3 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{CO})_{3,3} = [CO]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}; \quad (R_{H_2})_{3,3} = [H_2]_{\Sigma,2} \omega_{3,3};$$

$$(R_{CH_4})_{3,3} = [CH_4]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}; \quad (R_{H_2O})_{3,3} = [H_2O]_{\Sigma,2} \omega_{3,3}.$$

Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то $(R_{CH_4})_{3,3} = 0$.

Результатом решения (19) является искомая величина n .

Реакция 4 ЗВП: $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \leftrightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$.

Выражение константы равновесия химической реакции и ее численное значение [4, 10–14] запишутся в следующем виде:

$$K_{4,3} = \frac{[\text{CH}_4]_{4,3} \cdot [\text{H}_2\text{O}]_{4,3}^2}{[\text{CO}]_{4,3} \cdot [\text{H}_2]_{4,3}^4}; \quad (20)$$

$$\lg K_{4,3} = \frac{7674}{T} - 6,23 \lg T + 0,906 \cdot 10^{-3} T + 0,596 \cdot 10^{-7} T^2 + 8,79;$$

$$[\text{H}_2]_{4,3} = (R_{\text{H}_2})_{4,3} - 4p; \quad [\text{CO}_2]_{4,3} = (R_{\text{CO}_2})_{4,3} - p;$$

$$[\text{CH}_4]_{4,3} = (R_{\text{CH}_4})_{4,3} + p; \quad [\text{H}_2\text{O}]_{4,3} = (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,3} + 2p,$$

где $4p$ – количество H_2 , прореагировавшее в реакции 4 ЗВП, выраженное в % от 100 кмоль генераторного газа [15];

$$(R_{\text{CO}_2})_{4,3} = [\text{CO}_2]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}; \quad (R_{\text{H}_2})_{4,3} = [\text{H}_2]_{\Sigma,2} \omega_{4,3};$$

$$(R_{\text{CH}_4})_{4,3} = [\text{CH}_4]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}; \quad (R_{\text{H}_2\text{O}})_{4,3} = [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,2} \omega_{4,3}.$$

Поскольку метан CH_4 отсутствует среди компонентов генераторного газа в ОВЗ и ВЗ, то $(R_{\text{CH}_4})_{4,3} = 0$.

Результатом решения (20) является искомая величина p .

Для вычисления конечного значения компонента генераторного газа CO на выходе из зоны взаимодействия продуктов между собой и углеродом топлива использовано следующее выражение:

$$[\text{CO}]_{\Sigma,3} = [\text{CO}]_{\Sigma,2} - \sum_{i=1}^{i=4} (R_{\text{CO}})_{i,3} + \sum_{i=1}^{i=4} [\text{CO}]_{i,3}.$$

Аналогично вычисляются $[\text{CO}_2]_{\Sigma,3}$, $[\text{H}_2]_{\Sigma,3}$, $[\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,3}$

$$[\text{N}_2]_{\Sigma,3} = 100 - ([\text{CO}]_{\Sigma,3} + [\text{CO}_2]_{\Sigma,3} + [\text{H}_2]_{\Sigma,3} + [\text{H}_2\text{O}]_{\Sigma,3}).$$

Результаты расчетов по разработанному методу сравнивались с данными газового анализа сухого состава генераторного газа и приведены в табл. 3. Сравнение расчетных и опытных данных осуществлялось при одинаковых значениях содержания азота N_2 , не участвующего ни в одной из химических реакций. Данные опытов Д. Б. Гинзбурга [3] по газификации березы влажностью 28 % (табл. 1) сопоставлялись с результатами расчетов по разработанному методу при коэффициенте избытка воздуха $\alpha = 0,33$. Получено приемлемое совпадение расчетных и опытных значений состава генераторного газа по всем его компонентам.

Таблица 3

Сухой состав генераторного газа из березы влажностью 28 %
по разработанному методу*

The dry composition of the generator gas produced from birch with moisture 28 %
calculated by this method*

α	CO, %	CO ₂ , %	H ₂ , %	O ₂ , %	CH ₄ , %	N ₂ , %	Q _н ^p , кДж/м ³
0,1	35,36	10,79	14,45	0,00	6,40	33,00	8353
0,2	30,88	9,18	12,44	0,00	5,61	41,89	7282
0,3	27,41	7,96	10,87	0,00	5,01	48,75	6456
0,31	27,10	7,86	10,73	0,00	4,96	49,36	6383
0,32	26,81	7,76	10,60	0,00	4,90	49,93	6313
0,33	26,52	7,66	10,47	0,00	4,85	50,50	6244
0,34	26,23	7,56	10,33	0,00	4,81	51,07	6176
0,35	25,95	7,47	10,21	0,00	4,76	51,61	6110
0,4	24,65	7,03	9,62	0,00	4,54	54,17	5801
0,5	22,40	6,28	8,60	0,00	4,16	58,57	5269
0,6	20,49	5,60	7,53	0,00	3,89	62,49	4813
0,7	18,91	5,10	6,81	0,00	3,63	65,55	4442
0,8	17,27	4,65	5,60	0,00	3,58	68,90	4083
0,9	16,15	4,29	5,16	0,00	3,36	71,04	3816
1,0	15,10	3,98	4,61	0,00	3,22	73,09	3573
1,2	15,66	5,03	4,40	0,00	2,53	72,39	3375
1,4	15,61	5,14	3,25	0,00	2,27	73,73	3154
1,6	15,98	5,20	2,62	0,00	2,11	74,09	3077
1,8	16,34	5,38	2,56	0,00	1,89	73,83	3036
2,0	16,62	5,46	2,32	0,00	1,74	73,86	2993
3,0	17,43	5,54	1,07	0,00	1,39	74,57	2836

*Температура воздуха 283 К, относительная влажность воздуха 70 %. Температуры по зонам [5]: окислительно-восстановительная 1500 К, восстановительная 1275 К, зона взаимодействия продуктов друг с другом и углеродом топлива 950 К.

ВЫВОДЫ

1. Предложен новый метод расчета состава древесного генераторного газа, представляющий совокупность модифицированного общепринятого балансового метода [2] и добавленного метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций в активных зонах газификации с различными температурами. В данном методе различают не одну, а три активные зоны газификации: окислительно-восстановительную, восстановительную и зону взаимодействия продуктов газификации между собой и с углеродом вновь поступающего нагретого топлива. В материальном и тепловом балансе устранены основные недостатки общепринятого метода [2].

2. По величине изменения свободной энтальпии (энергии Гиббса) ряда химических реакций процесса газификации древесины проведена оценка

химического сродства реагентов, выявлены преобладающие (основные) химические реакции, установлен их приоритет в конкретных температурных условиях (активных зонах) и найдены доли этих реакций в системе химических превращений.

3. Метод расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций позволяет определять концентрации продуктов основных химических реакций в каждой из активных зон по начальным концентрациям исходных веществ или их соединений (газов), температуре и константам равновесия этих реакций.

4. Разработанный метод расчета компонентов генераторного газа, состоящий из балансового метода (материальный и тепловой балансы) и метода расчета концентраций продуктов химических реакций по константам равновесия этих реакций, позволяет более достоверно моделировать процесс газификации древесного топлива в газогенераторе обращенного процесса и получать приемлемое согласование расчетных и опытных данных по составу генераторного газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Газогенератор твердого топлива: пат. 2579112 РФ, МПК F23G5/027, C10J3/00 / Е. М. Кашин, В. Н. Диденко; опубл. 27.03.2016.
2. Юдушкин, Н. Г. Газогенераторные тракторы. Теория, конструкция и расчет / Н. Г. Юдушкин. М.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1955. 244 с.
3. Гинзбург, Д. Б. Газификация низкосортного топлива / Д. Б. Гинзбург. М.: Гос. изд-во лит-ры по строит. матер., 1950. 173 с.
4. Федосеев, С. Д. Полукоксование и газификация твердого топлива / С. Д. Федосеев, А. Б. Чернышев. М.: Гос. науч.-техн. изд-во нефтян. горно-топлив. лит-ры, 1960. 327 с.
5. Коллеров, Л. К. Газомоторные установки / Л. К. Коллеров. М., СПб.: Гос. науч.-техн. изд-во машиностроит. лит-ры, 1951. 240 с.
6. Лямин, В. А. Газификация древесины / В. А. Лямин. М.: Лесная промышленность, 1967. 263 с.
7. Равдель, А. А. Краткий справочник физико-химических величин / А. А. Равдель, А. М. Пономарева. 8-е изд., перераб. Л.: Химия, 1983. 232 с.
8. Головков, С. И. Энергетическое использование древесных отходов / С. И. Головков, И. Ф. Коперин, В. И. Найденов. М.: Лесная промышленность, 1987. 221 с.
9. Токарев, Г. Г. Газогенераторные автомобили / Г. Г. Токарев. М.: МАШГИЗ, 1955. 204 с.
10. Дешалит, Г. И. Расчеты процессов газификации топлив / Г. И. Дешалит. Харьков: Изд-во Харьковского Ордена Трудового Красного Знамени гос. ун-та имени А. М. Горького, 1959. 167 с.
11. Богданов, Н. Н. Полукоксование и газификация торфа / Н. Н. Богданов. М.; Л.: Гос. энергетич. изд-во, 1947. 271 с.
12. Лавров, Н. В. Физико-химические основы горения и газификации топлива / Н. В. Лавров. М.: Гос. науч.-техн. изд-во по черной и цветной металлургии, 1957. 289 с.
13. Лавров, Н. В. Введение в теорию горения и газификации топлива / Н. В. Лавров, А. П. Шуригин. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1962. 217 с.
14. Совершенствование техники и технологии процесса газификации высоковлажных древесных отходов / Н. Ф. Тимербаев [и др.]. Казань: Изд-во КНИТУ, 2013. 92 с.

15. Иноземцев, Н. В. Основы термодинамики и кинетики химических реакций / Н. В. Иноземцев. М.: Военная Академия механизации и моторизации Красной Армии имени Сталина, 1940. 257 с.

Поступила 18.05.2018 Подписана в печать 27.02.2019 Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Kashin E. M., Didenko V. N. (2016) *The Gasifier of Solid Fuel*. Patent No 2579112 of the Russian Federation (in Russian).
2. Yudushkin N. G. (1955) *Gas Generator Tractors. Theory, Design, Calculation*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 244 (in Russian).
3. Ginzburg D. B. (1950) *The Gasification of Low-Grade Fuel*. Moscow, State Publishing House of Literature on Construction Materials. 173 (in Russian).
4. Fedoseev S. D., Chernyshev A. B. (1960) *Semi-Coking and Gasification of Solid Fuel*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Oil and Mine Fuel Literature. 327 (in Russian).
5. Kollerov L. K. (1951) *Gas Engine Installations*. Sankt-Petersburg, State Scientific-and-Technical Publishing House of Mechanical Engineering Literature. 240 (in Russian).
6. Lyamin V. A. (1967) *Wood Gasification*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 263 (in Russian).
7. Ravdel' A. A., Ponomareva A. M. (1983) *Concise Reference Book of Physical and Chemical Magnitudes*. 8th ed. Leningrad, Khimiya Publ. 232 (in Russian).
8. Golovkov S. I., Koperin I. F., Naidenov V. I. (1987) *Energy Use of Wood Waste*. Moscow, Lesnaya Promyshlennost' Publ. 221 (in Russian).
9. Tokarev G. G. (1955) *Gas Generator Automobiles*. Moscow, MASHGIZ Publ. 204 (in Russian).
10. Deshalit G. I. (1959) *The Calculations of the Fuel Gasification Processes*. Kharkov, Publishing House of the Kharkiv Labour Red Banner Order State University named after A. M. Gor-ky. 167 (in Russian).
11. Bogdanov N. N. (1947) *Semi-Coking and Gasification of Peat*. Moscow, Leningrad, State Power Engineering Publ. 271 (in Russian).
12. Lavrov N. V. (1957) *Physical and Chemical Bases of Combustion and Gasification of Fuel*. Moscow, State Scientific-and-Technical Publishing House of Ferrous and Nonferrous Metallurgy. 289 (in Russian).
13. Lavrov N. V., Shurigin A. P. (1962) *Introduction to the Theory of Combustion and Gasification of Fuel*. Moscow, Publishing House of USSR Academy of Sciences. 217 (in Russian).
14. Timerbaev N. F., Safin R. G., Hisameeva A. R., Ishakov T. D. (2013) *Improvement of the Equipment and Technology of Gasification Process of High-Moist Wood Waste*. Kazan, KNITU Publ. 92 (in Russian).
15. Inozemtsev N. V. (1940) *Basics of Thermodynamics and Kinetics of Chemical Reactions*. Moscow, Military Red Army Mechanization and Motorization Academy named after Stalin. 257 (in Russian).

Received: 18 May 2018

Accepted: 27 February 2019

Published online: 31 July 2019

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-362-376>

УДК 338

Основные подходы к экономической диагностике предприятий энергетики

Т. Ф. Манцерова¹⁾, Д. А. Лапченко¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Рассматриваются особенности проведения экономической диагностики предприятий энергетики в Республике Беларусь. Учет и анализ деятельности объектов энергосистемы в условиях формируемого рынка энергии требуют совершенствования подходов к экономическому мониторингу, что может быть обеспечено посредством комплексной системы экономической диагностики предприятия. Структура экономической диагностики представлена тремя элементами – экспресс-диагностикой, диагностикой банкротства и комплексной диагностикой экономического состояния, каждый из которых имеет свои цели и задачи исследования, состав анализируемой отчетности и проводимых аналитических процедур. Выбор методики проведения экономической диагностики также зависит от стадии жизненного цикла предприятия. Но основное влияние на проведение диагностики оказывает специфика вида экономической деятельности. В статье отражены особенности использования методик экспресс-диагностики, диагностики банкротства на основе многофакторных моделей и комплексной диагностики на предприятиях энергетики (на примере РУП-облэнерго). Проведенное исследование показало, что применение универсальных финансовых коэффициентов в экспресс-оценке и моделей оценки риска банкротства для отечественных предприятий энергетики не вполне подходит, так как эти методики не учитывают сложившуюся специфику структуры капитала организаций энергосистемы. Авторы приходят к выводу, что каждый из подходов к диагностике позволяет оценить лишь отдельные критерии состояния экономики организации. Для повышения эффективности аналитической работы на предприятиях энергосистемы необходимо совершенствование диагностических процедур с учетом технологических особенностей производства и влияния факторов внешней и внутренней среды, и только комплексная диагностика может дать всестороннюю объективную оценку деятельности предприятия на всех этапах его жизненного цикла.

Ключевые слова: энергетика, экономическая диагностика, основные характеристики, экспресс-диагностика, диагностика банкротства, комплексная диагностика экономического состояния

Для цитирования: Манцерова, Т. Ф. Основные подходы к экономической диагностике предприятий энергетики / Т. Ф. Манцерова, Д. А. Лапченко // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 362–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-362-376>

Адрес для переписки

Манцерова Татьяна Феликсовна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

Address for correspondence

Mantserova Tatiana F.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

The Main Approaches to Economic Diagnostics of the Power Engineering Enterprises

T. F. Mantserova¹⁾, D. A. Lapchenko¹⁾

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

Abstract. The features of economic diagnostics of power engineering enterprises in the Republic of Belarus are considered. Accounting and analysis of the activities of enterprises of the power system in the emerging energy market requires improving approaches of economic monitoring. This can be achieved through a comprehensive system of economic diagnostics of the enterprise. The structure of economic diagnostics is represented by three elements, viz.: rapid diagnostics, diagnostics of bankruptcy and complex diagnostics of the economic condition, each of which has its own purpose and objectives of the study, as well as its own content of the reports to be analyzed reporting and of analytical procedures to be fulfilled. The choice of methods of economic diagnostics also depends on the stage of the life cycle of the enterprise. But it is the specificity of the type of economic activity that has a major impact on the diagnosis. The article describes the specific features of using methods of express-diagnostics, diagnostics of bankruptcy based on multivariate models as well as of integrated diagnosis of power utilities (by example of “Oblenergo” enterprises). The study demonstrated that the use of universal financial ratios in rapid assessment and models for assessing the risk of bankruptcy for domestic energy enterprises is not quite suitable, since these methods do not take into account the existing specifics of the structure of the capital of the organizations of power engineering system. The authors came to the conclusion that each of the approaches to diagnosis makes it possible to evaluate only individual criteria of the state of the economy of the organization. To improve the efficiency of analytical work at the enterprises of the power system, it is necessary to improve diagnostic procedures taking into account the technological features of production and the influence of factors of the external and internal environment. Only a comprehensive diagnosis can give a comprehensive unbiased assessment of the enterprise at all stages of its life cycle.

Keywords: energy, economic diagnostics, key features, rapid diagnosis, diagnosis of bankruptcy, comprehensive diagnosis of the economic condition

For citation: Mantserova T. F., Lapchenko D. A. (2019) The Main Approaches to Economic Diagnostics of the Power Engineering Enterprises. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 362–376. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-62-4-362-376> (in Russian)

Введение

Республика Беларусь является страной – нетто-импортером топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), импортируя значительные объемы нефти, газа. При этом более 80 % всех поставок ТЭР осуществляются от одного доминирующего поставщика – Российской Федерации. Это создает значительные риски для энергетической безопасности республики. Для полноценного функционирования энергетики, привлечения инвесторов, устранения перекрестного субсидирования, установления оптимального уровня тарифов необходимо проведение реструктуризации электроэнергетики. Это может быть обеспечено при работе предприятий энергосистемы в условиях формируемого рынка энергии. Учет деятельности объектов энергетики в новых условиях требует иного подхода к экономическому мониторингу, что может быть обеспечено посредством комплексной системы экономической диагностики предприятия.

Основная часть

Учеными-экономистами давно исследуется проблема экономической диагностики. Известен ряд авторских определений экономической диагностики. По мнению Р. И. Шнипера [1], «экономическая диагностика определяется как изучение состояния хозяйствующего субъекта, влияние факторов развития социально-экономических процессов и выявление отклонений от нормального развития. Экономическая диагностика ориентирована как на познание экономических противоречий, так и на разработку мер по их решению. Комплексный характер экономической диагностики заключается в том, чтобы проследить динамику исследуемых процессов во взаимосвязи, исследовать прямые и обратные связи между процессами. Диагностические методы призваны отражать причинно-следственные связи и зависимости». В то же время О. Г. Дмитриева [2] считает, что «экономическая диагностика близка к экономическому анализу, однако это не одно и то же. Они различаются по целям, задачам и используемому инструментарию».

Авторы А. С. Цареградская и И. В. Поповиченко обращают внимание на то, что «следует различать термины «диагностика» и «анализ»: диагностика (в пер. с греч. диагнозис) – распознавание, определение, а анализ (в пер. с греч. анализис) – разложение, расчленение. Анализ представляет собой разложение объекта на составляющие его части для познания целого. Из этого следует, что и диагностику используют в процессе анализа, и распознавание (диагностика) происходит с помощью анализа. Целью диагностики является выявление проблем, «узких мест» в функционировании объекта» [3].

Большой экономический словарь [4] трактует экономическую диагностику следующим образом: «Экономическая диагностика предприятия – это анализ и оценка экономических показателей работы предприятия на основе изучения отдельных результатов, неполной информации с целью выявления возможных перспектив его развития и последствий текущих управленческих решений».

В структуре экономической диагностики можно выделить такие основные разделы, как экспресс-диагностика, диагностика банкротства и комплексная диагностика экономического состояния [3, 5, 6]. Каждый из выделенных разделов решает свои тематические задачи для оценки деятельности субъекта хозяйствования, имеет свою цель исследования, состав анализируемой отчетности и проводимых процедур, результирующие данные. Они могут использоваться как автономно, так и взаимно дополняя друг друга, что позволяет получать развернутую картину экономической деятельности предприятия (табл. 1).

Так, общепризнано, что «экспресс-диагностика предполагает небольшие затраты времени для получения предварительной оценки. Затем для более детального анализа проводятся дополнительные аналитические исследования по выделенным направлениям. Экспресс-диагностика заключается в исследовании текущих аспектов деятельности предприятия» [7].

Таблица 1

Основные характеристики экономической диагностики

Main characteristics of economic diagnostics

Характеристика	Экономическая диагностика		
	Экспресс-диагностика	Диагностика банкротства	Комплексная диагностика экономического состояния
Цель	Выделить наиболее сложные проблемы управления организацией в целом, особенно финансовыми ресурсами	Оценить вероятность банкротства организации	Выявить проблемы организации, сильные и слабые стороны, место организации на рынке, дать комплексную оценку состояния экономики организации
Система учета данных	Управленческий учет	Финансовый (бухгалтерский) учет с элементами управленческого учета	Финансовый (бухгалтерский) учет, статистический учет, оперативный учет, налоговый учет
Состав процедуры	Анализ финансовой устойчивости и платежеспособности, анализ деловой активности	Трендовый анализ системы критериев и показателей, расчет интегральных показателей, КРА, ЭММ	Ситуационный анализ, организационно-управленческий анализ, финансовый анализ, технико-экономический анализ, анализ кадрового потенциала, оценка бизнеса
Состав анализируемой отчетности	Данные оперативного учета и финансовой отчетности	Финансовая отчетность, оперативная информация	Финансовая и статистическая отчетность
Результирующие данные	Предварительные	Точные (реальные)	Сводные (комплексные)
Выводы	Вероятностные	Оценка вероятности возможных финансовых затруднений и банкротства в будущем	Точные, позволяющие обнаружить проблемы и определить пути их решения

Н. В. Родионова [8] дает следующее определение: «Экспресс-диагностика (термометр) – формальная оценка близости состояния предприятия к банкротству на основе регулярного вычисления соответствующих коэффициентов и данных баланса. Здесь преследуются такие цели: выявить тенденции изменения состояния предприятия, дать оценку глубины его несостоятельности и провести анализ финансового оборота, обеспечивающего хозяйственную деятельность».

Экспресс-диагностика предприятия проводится по ограниченному числу показателей. Эта информация должна дать оперативный ответ в сжатые сроки в режиме онлайн на запрос руководства организации или собственников об эффективности производства и управления и представлена системой управленческого учета.

Диагностика банкротства на основе анализа результатов общепризнанных моделей банкротства дает оценку вероятности наступления банкрот-

ства организации [9, 10]. В [11] предлагается к рассмотрению финансовая модель оценки риска банкротства скорингового типа.

Комплексную оценку производственно-хозяйственной деятельности организации дает комплексная диагностика экономического состояния, включающая анализ всех имеющихся активов, обязательств и капитала [12]. Для этих целей используется значительный перечень финансовой, статистической и оперативной отчетности организации [13, 14].

Экономический мониторинг деятельности предприятия неразрывно связан с этапами его жизненного цикла (рис. 1). Это накладывает свои специфические особенности на выбор методики проведения экономической диагностики. Так, на стадии возникновения организации необходимо осознание, какой продукт или какую услугу будет оказывать организация, определяется круг потенциальных потребителей, уточняются запросы рынка. Это требует постоянного обновления информации об объекте в связи с запросами рынка. Информацию такого рода может предоставить экспресс-диагностика.

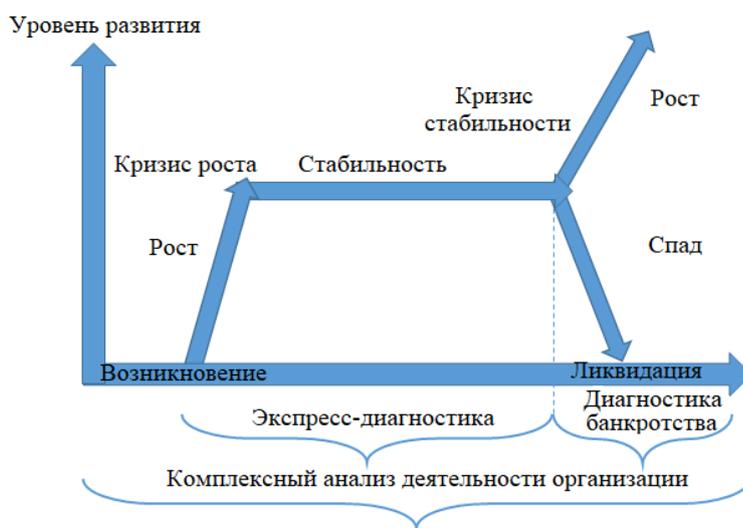


Рис. 1. Использование экономической диагностики на различных этапах жизненного цикла организации

Fig. 1. The use of economic diagnostics at different stages of the life cycle of the organization

На стадии роста организация уже имеет свою нишу на рынке и стремится к ее увеличению, есть стабильный спрос на выпускаемую продукцию, разрабатывается комплекс мероприятий, направленных на повышение эффективности бизнеса. Этап стабильности деятельности предприятия характеризуется высокой прибыльностью, адаптивностью к рискам и угрозам как внешней, так и внутренней среды организации. Это обеспечивается качественным маркетингом и постоянным мониторингом текущей и прогнозной ситуации. Экспресс-диагностика позволит на данных

этапах удовлетворить потребности высшего менеджмента для выработки стратегических целей и в случае необходимости – их быстрой корректировки.

Однако этап стабильности в деятельности организации может уже быть подвержен скрытым угрозам, отсутствие должного внимания к которым может привести к спаду и, как следствие, к банкротству. Диагностика банкротства позволяет своевременно выявлять негативные тенденции и принимать на основе проведенного анализа эффективные управленческие решения [11].

Всестороннюю оценку деятельности организации на всех этапах жизненного цикла может дать комплексная диагностика экономического состояния [12].

Вид экономической деятельности, особенности технологического цикла накладывают свою специфику на проведение процедур экономической диагностики. Например, для энергетики, занимающей доминирующее положение в структуре национальной экономики республики и оказывающей существенное влияние на результативность предприятий как реального сектора экономики, так и сферы услуг, экономическая диагностика также имеет свои отличительные черты и особенности.

Экспресс-диагностика предприятий энергетики нацелена, прежде всего, на выявление и снижение уровня дебиторской задолженности, которая возникает в результате срыва сроков оплаты юридическими и физическими лицами объемов потребленной электро- и теплоэнергии [3, 15]. Для осуществления бесперебойного снабжения предприятий промышленности и бытового сектора энергией и теплом энергетики вынуждены брать кредиты для последующей закупки топлива. Дорогие кредитные ресурсы негативно влияют на финансовое состояние предприятий. Ввиду этого, требует ужесточения и пересмотра система оплаты услуг предприятий энергосистемы. В настоящее время к отдельным социально значимым объектам (образование, медицина, культура) не могут быть применены санкции в виде отключения от системы электроснабжения. В большинстве случаев такие меры не применяются и к должникам из числа населения. Для предупреждения негативных последствий финансового кризиса на предприятиях энергетики в настоящее время предусмотрена предоплата для юридических лиц [16, 17].

Проведение экспресс-диагностики организаций в Республике Беларусь основано на использовании единого методического подхода в соответствии с Инструкцией о порядке расчета коэффициентов платежеспособности и проведения анализа финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования [18]. Рассчитанные в рамках экспресс-диагностики финансовые коэффициенты, характеризующие финансовое состояние РУП-облэнерго, представлены в табл. 2.

Фактический уровень коэффициентов, характеризующих структуру финансовых источников средств, свидетельствует о том, что РУП-облэнерго проводит умеренную финансовую политику, и степень финансового риска не превышает нормативный уровень при сложившейся структуре капитала. Однако не все коэффициенты платежеспособности соответствуют норма-

тивными значениям, что свидетельствует о неустойчивом финансовом положении организации. Специфику работы РУП-облэнерго во многом определяют неплатежи за поставленную тепловую и электрическую энергию, вызывая тем самым увеличение дебиторской задолженности и объясняя низкую долю денежных средств. По показателям деловой активности нет возможности сформулировать однозначный вывод: замедление оборачиваемости текущих активов потребовало дополнительного вовлечения в оборот средств, но предпринятые руководством РУП-облэнерго меры по выходу предприятия на безубыточную работу позволили несколько улучшить финансовое положение организации.

Таблица 2

**Показатели финансовой устойчивости и деловой активности РУП-облэнерго
“Oblenergo” enterprises indicators of financial stability and business performance**

Показатель	Значение	
	на начало года	на конец года
Коэффициент финансовой независимости (норматив 0,40–0,60)	0,70	0,66
Коэффициент капитализации (норматив $\leq 1,00$)	0,43	0,51
Коэффициент текущей ликвидности (норматив 1,10)	1,32	1,21
Коэффициент абсолютной ликвидности (норматив 0,20)	0,11	0,08
Коэффициент обеспеченности собственными оборотными средствами (норматив 0,25)	0,22	– (Не рассчитывается, так как отсутствуют собственные оборотные средства)
Коэффициент оборачиваемости краткосрочных активов	2,26	2,17
Рентабельность реализации, %	–4,4	–3,0

В настоящее время институт банкротства к предприятиям энергетики в Республике Беларусь не применим. Он может быть востребован только при работе предприятий энергетики в условиях рынка, но и здесь возможны ограничения по применению общих для субъектов хозяйствования подходов.

В аналитической практике для диагностики вероятности используются различные методические подходы – применение систем индикаторов возможного банкротства, многомерного рейтингового анализа, многофакторных моделей, разработанных на основе дискриминантного анализа, и др. [10].

В области прогнозирования банкротства наиболее широкую известность получила многофакторная Z-модель Э. Альтмана, которая в США является одним из основных методов оценки вероятности банкротства компаний [9]. В зависимости от значения Z-счета по определенной шкале (табл. 3) произведена оценка вероятности наступления банкротства в течение двух лет для РУП-облэнерго (табл. 4).

Таблица 3

Уровень угрозы банкротства в модели Альтмана

The level of bankruptcy threat in the Altman model

Значение интегрального показателя Z	Вероятность банкротства
Менее 1,81	Очень высокая
От 1,81 до 2,70	Высокая
От 2,70 до 2,99	Невелика
Более 2,99	Ничтожна, очень низкая

Таблица 4

Расчет показателей модели Альтмана для РУП-облэнерго

Calculation of the indicators of Altman's model for "Oblenergo" enterprises

Показатель	Содержание показателя	Значение	
		на начало года	на конец года
x_1	Соотношение оборотного капитала и активов предприятия (отражает долю ликвидных активов компании в общей сумме активов)	0,14	0,13
x_2	Соотношение нераспределенной прибыли и активов компании (финансовый рычаг)	0,95	0,93
x_3	Размер прибыли до налогообложения по отношению к стоимости активов	0,11	0,09
x_4	Отношение собственного капитала к заемному капиталу	8,52	10,05
x_5	Коэффициент, характеризующий рентабельность активов (отношение объема реализации к общей стоимости активов)	0,45	0,48
Z	$Z = 0,717x_1 + 0,847x_2 + 3,107x_3 + 0,42x_4 + 0,995x_5$	7,42	8,27
Вероятность банкротства		Очень низкая	

В 1977 г. британские ученые Р. Таффлер и Г. Тишоу использовали метод Альтмана и построили четырехфакторную модель прогноза вероятности банкротства (в табл. 5 представлены результаты использования модели для РУП-облэнерго). Если значение Z -счета больше 0,3, это говорит о том, что у организации неплохие долгосрочные перспективы, если меньше 0,2, то банкротство более чем вероятно [9].

Канадским ученым Г. Спрингейтом в 1978 г. на основе пошагового дискриминантного анализа, предложенного Э. Альтманом, была разработана модель прогнозирования платежеспособности организаций, в которой использованы четыре показателя, по мнению автора, наиболее точно определяющих платежеспособность компании (табл. 6 отражает результаты применения модели для РУП-облэнерго). Предприятие классифицируется как банкрот, если $Z < 0,862$.

Таблица 5

Расчет показателей модели Р. Таффлера и Г. Тишоу для РУП-облэнерго

Calculation of parameters of the model of R. Taffler and G. Tisshaw
for "Oblenergo" enterprises

Показатель	Содержание показателя	Значение	
		на начало года	на конец года
x_1	Отношение прибыли (убытка) от реализации к сумме текущих обязательств (показывает степень выполнимости обязательств за счет внутренних источников финансирования)	0,27	0,26
x_2	Отношение суммы текущих активов к общей сумме обязательств (описывает состояние оборотного капитала)	0,18	0,19
x_3	Отношение суммы текущих обязательств к общей сумме активов (показатель финансовых рисков)	0,08	0,07
x_4	Отношение выручки к общей сумме активов (определяет способность предприятия рассчитываться по обязательствам)	0,45	0,48
Z	$Z = 0,53x_1 + 0,13x_2 + 0,18x_3 + 0,16x_4$	0,11	0,11
Вероятность банкротства		Вполне вероятна	

Таблица 6

Расчет показателей модели Г. Спрингейта для РУП-облэнерго

Calculation of parameters of the model G. Springate for "Oblenergo" enterprises

Показатель	Содержание показателя	Значение	
		на начало года	на конец года
x_1	Соотношение оборотного капитала и активов предприятия	0,06	0,06
x_2	Соотношение нераспределенной прибыли и активов компании (финансовый рычаг)	0,11	0,09
x_3	Отношение прибыли до оплаты налогов к краткосрочной задолженности	1,47	1,36
x_4	Отношение объема продаж к общей стоимости активов	0,45	0,48
Z	$Z = 1,03x_1 + 3,07x_2 + 0,66x_3 + 0,4x_4$	1,55	1,43
Вероятность банкротства		Очень низкая	

В 1997 г. сотрудниками Иркутской государственной экономической академии был проведен опрос директоров торговых негосударственных предприятий с целью выделения показателей оценки состояния бизнеса, что позволило выделить основные параметры (сумма чистой прибыли, выручка от реализации, затраты на производство и реализацию продукции, величина собственного капитала предприятия, размер всего капитала предприятия), на основе которых предложена четырехфакторная R -модель

оценки вероятности банкротства. В соответствии со значением R -показателя вероятность банкротства организации определяется в зависимости от диапазона следующим образом:

- максимальная вероятность банкротства (90–100 %) при $R < 0$;
- высокая (60–80 %) при $0 \leq R < 0,18$;
- средняя (35–50 %) при $0,18 \leq R < 0,32$;
- низкая (15–20 %) при $0,32 \leq R < 0,42$;
- минимальная (до 10 %) при $R > 0,42$.

Результаты применения модели к оценке деятельности РУП-облэнерго представлены в табл. 7.

Таблица 7

Расчет показателей модели Иркутской государственной экономической академии для РУП-облэнерго

Calculation of indicators of the Irkutsk State Economic Academy model for "Oblenergo" enterprises

Показатель	Содержание показателя	Значение	
		на начало года	на конец года
K_1	Коэффициент эффективности использования активов предприятия, рассчитываемый как отношение собственного оборотного капитала к сумме активов	0,0008	-0,028
K_2	Коэффициент, определяющий рентабельность, – отношение чистой прибыли к собственному капиталу	0,0009	-0,018
K_3	Коэффициент оборачиваемости активов – выручка от реализации, отнесенная к средней величине активов	0,52	0,57
K_4	Норма прибыли – доля чистой прибыли на единицу затрат	0,0015	-0,0230
R	$R = 8,38K_1 + K_2 + 0,054K_3 + 0,63K_4$	0,037	-0,236
Вероятность банкротства		Очень высокая	

Таким образом, можно оценить, насколько кризисным является финансовое положение РУП-облэнерго: по модели Альтмана и Спрингейта результаты проведенных расчетов показали устойчивое финансовое положение и низкую вероятность банкротства. Однако четырехфакторная модель Таффлера и Тишоу выявила другой результат в виде возможной вероятности банкротства. Результаты, полученные с помощью реализации алгоритма, основанного на созданной Иркутской государственной экономической академией модели, свидетельствуют о крайне неустойчивом финансовом положении предприятия.

Проведенный анализ вероятности банкротства с использованием различных моделей оценки по РУП-облэнерго продемонстрировал разновекторность результатов расчета. Тестирование по данным моделям показало, что они не вполне могут подходить для оценки риска банкротства отечественных предприятий энергетики, так как не учитывают сложившуюся специфику структуры капитала организаций энергосистемы.

Для проведения комплексной диагностики экономического состояния РУП-облэнерго и его филиалов можно использовать следующие группы показателей:

1) производственные – выработка и полезный отпуск электро- и теплоэнергии, расход энергии на собственные нужды и передача ее по сетям и др.;

2) расход материалов – топлива, вспомогательных материалов, запасных частей для ремонта (в значительной степени зависит от производственной программы и технического состояния оборудования);

3) экономические – объем реализованной продукции, себестоимость энергии, уровень оплаты труда, прибыль, налоги, направления использования прибыли, показатели финансового состояния (базируются на показателях первых двух групп с добавлением стоимостных характеристик: цен, тарифов, экономических нормативов);

4) экологические – объемы твердых, жидких и газообразных выбросов в окружающую среду, плата за них (связаны с производственными и экономическими показателями);

5) оценочные – коэффициент эффективности использования рабочей мощности для РУП-облэнерго и рабочая мощность для электростанций (используются для расчетов между РУП-облэнерго и генерирующими энергопредприятиями) [19].

Основные технико-экономические показатели, используемые для комплексной диагностики состояния экономики РУП-облэнерго, представлены в табл. 8.

По итогам работы за отчетный год наблюдается увеличение выручки от реализации продукции, вызванное ростом средневзвешенного курса доллара к прошлому году, ростом тарифов на электрическую и тепловую энергию.

Рост затрат на производство и реализацию продукции вызван повышением средневзвешенного курса доллара к аналогичному периоду прошлого года, ростом НДС, увеличением амортизации в связи с вводом новых объектов, увеличением ремонтно-эксплуатационных затрат, повышением уровня заработной платы. Неудовлетворительный финансовый результат обусловлен: недополучением выручки от реализации продукции вследствие снижения полезного отпуска электрической энергии промышленными и приравненными к ним потребителями при общем снижении полезного отпуска электрической энергии собственным потребителям; изменением структуры потребления (значительное снижение электропотребления потребителями высокотарифной промышленной группы); индексацией тарифов на электрическую и тепловую энергию на изменение курса доллара США.

В силу различных обстоятельств в условиях государственного регулирования цен и тарифов, значительного повышения цен на энергоносители, не компенсированного соответствующим ростом тарифов на электрическую и тепловую энергию для реального сектора экономики, РУП-облэнерго находится в тяжелом финансовом положении и осуществляет свою деятельность в условиях плановой убыточности.

Таблица 8

Технико-экономические показатели деятельности РУП-облэнерго

Indicators of technical and economic performance
of "Oblenergo" enterprises activity

Показатель	Значение	
	за предыдущий год	за отчетный год
Отпуск электроэнергии с шин, млн кВт·ч	8811,50	7900,59
Покупная электроэнергия, млн кВт·ч	3471,50	3990,99
Полезный отпуск электроэнергии, млн кВт·ч	10514,30	10175,70
Отпуск теплоэнергии, тыс. Гкал	13306,14	13246,60
Полезный отпуск теплоэнергии, тыс. Гкал	11558,50	11540,60
Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии, г/(кВт·ч)	227,6	225,9
Удельный расход условного топлива на выработку тепловой энергии, кг/Гкал	167,59	167,63
Себестоимость 1 единицы полезной отпущенной электроэнергии, руб./(кВт·ч)	0,08	0,09
Себестоимость 1 единицы полезной отпущенной тепловой энергии, руб./Гкал	32,54	34,99
Показатель по энергосбережению, тыс. т у. т.	156,1	107,9
Среднемесячная заработная плата персонала, дол.	522	706
Выручка от реализации продукции, тыс. руб.	1154310	1257014
Общая сумма затрат на производство и реализацию продукции, тыс. руб.	1213629	1300445
Прибыль (убыток) от реализации продукции, тыс. руб.	-59319	-43431

С целью повышения эффективности производственно-хозяйственной деятельности РУП-облэнерго и минимизации запланированных убытков необходима реализация комплекса мероприятий по снижению затрат и повышению эффективности использования материальных и финансовых ресурсов.

ВЫВОДЫ

1. При проведении экономической диагностики с использованием трех ее составляющих можно отметить, что все упомянутые методы имеют общий недостаток – разобщенность. Выделяя достоинства и недостатки каждого из методов, авторы приходят к выводу, что «каждый из них позволяет оценить какой-то отдельный критерий экономического состояния, но нет комплексного интегрального показателя для диагностики организации» [5]. Поэтому в ближайшее время наукой и практикой должен быть устранен этот недостаток для повышения эффективности аналитической работы на предприятиях.

2. Как показал проведенный анализ, технологические особенности производства, отраслевая принадлежность предприятия, влияние факторов внешней и внутренней среды предприятия вносят свои коррективы в проведение экономической диагностики, что необходимо учитывать при выборе соответствующих процедур диагностики.

3. Проведенный анализ вероятности банкротства с использованием различных моделей оценки по РУП-облэнерго продемонстрировал разновекторность результатов расчета. Тестирование по данным моделям показало, что они не вполне могут подходить для оценки риска банкротства отечественных предприятий энергетики, так как не учитывают сложившуюся специфику структуры капитала организаций энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шнипер, Р. И. Регион. Диагностика и прогнозирование / Р. И. Шнипер: отв. ред. В. В. Кулешов; Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т экономики и орг. пром. пр-ва. Новосибирск: ИЭИ ОПП, 1996. 134 с.
2. Дмитриева, О. Г. Региональная экономическая диагностика / О. Г. Дмитриева. СПб.: Изд-во Санкт-Петербур. ун-та экономики и финансов, 1992. 272 с.
3. Цареградская, А. С. Задачи и этапы экономической диагностики деятельности предприятия [Электронный ресурс] / А. С. Цареградская, И. В. Поповиченко. Режим доступа: http://rusnauka.com/5_PNW_2010/Economics/58887.doc.htm. Дата доступа: 08.02.2019.
4. Большой экономический словарь [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://big-economic_dictionary.academic.ru. Дата доступа: 08.02.2019.
5. Нестеренко, Е. Г. Оценка экономической безопасности отечественных автопроизводителей в условиях усиления экономической интеграции / Е. Г. Нестеренко, Н. Ю. Кудрина // Вестник Самарского государственного экономического университета. 2013. Т. 110, № 12. С. 39–42.
6. Зеленская, С. Г. Инвестиционный потенциал: методы диагностики экономического развития регионов / С. Г. Зеленская // ИнВестРегион. 2007. № 2. С. 35–37.
7. Эйхлер, Л. В. Диагностика экономического состояния предприятий по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей в системе антикризисного управления / Л. В. Эйхлер, Н. Г. Гавриленко. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 108 с.
8. Родионова, Н. В. Антикризисный менеджмент / Н. В. Родионова. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001. 223 с.
9. Савицкая, Г. В. Анализ эффективности и рисков предпринимательской деятельности: методологические аспекты / Г. В. Савицкая. 2-е изд., перераб. и доп. М.: ИНФРА-М, 2019. 291 с.
10. Смольский, А. П. Антикризисное управление / А. П. Смольский. Минск: Амалфея; Мисанта, 2018. 351 с.
11. Ариничев, И. В. Прогнозирование банкротства организации на основе метрических методов интеллектуального анализа данных / И. В. Ариничев, Л. Г. Матвеева, И. В. Ариничева // Вопросы регулирования экономики. 2018. Т. 9, № 1. С. 61–73.
12. Лапченко, Д. А. Анализ производственно-хозяйственной деятельности предприятия: учебное пособие для студентов специальности 1-27 01 01 «Экономика и организация производства» / Д. А. Лапченко, Т. Ф. Манцерова, Е. И. Тымкуль. Минск: БНТУ, 2017. 278 с.
13. Национальный стандарт бухгалтерского учета и отчетности «Консолидированная бухгалтерская отчетность» [Электронный ресурс]: постановление Министерства финансов Респ. Беларусь от 30 июня 2014 г. № 46. Режим доступа: http://minfin.gov.by/upload/accounting/acts/postmf_300614_46.pdf.

14. Национальный стандарт бухгалтерского учета и отчетности «Учетная политика организации, изменения в учетных оценках, ошибки» [Электронный ресурс]: постановление Министерства финансов Респ. Беларусь от 10 декабря 2013 г. № 80. Режим доступа: http://minfin.gov.by/upload/accounting/acts/postmf_101213_80.pdf.
15. Бурцева, М. Н. Проблемы экспресс-диагностики кризисного состояния предприятия / М. Н. Бурцева, Ю. С. Жарких // Научные записки ОрелГИЭТ. 2012. Т. 5, № 1. С. 255–259.
16. Манцерава, Т. Ф. Экспресс-диагностика как эффективный способ анализа / Т. Ф. Манцерава // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 13-й Междунар. науч.-техн. конф. Т. 1. Минск: БНТУ, 2015. С. 122–123.
17. Манцерава, Т. Ф. Экспресс-диагностика как эффективный способ анализа в антикризисном управлении / Т. Ф. Манцерава, Д. А. Лапченко // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов X Междунар. науч.-практ. конф., 30 марта 2017 г. / пред. редкол. С. Ю. Солюдовников. Минск: БНТУ, 2017. Т. 1. С. 157–159.
18. Об утверждении Инструкции о порядке расчета коэффициентов платежеспособности и проведения анализа финансового состояния и платежеспособности субъектов хозяйствования [Электронный ресурс]: постановление Министерства финансов Респ. Беларусь, Министерства экономики Респ. Беларусь, 27 дек. 2011 г., № 140/206: в ред. постановления Министерства финансов Респ. Беларусь, Министерства экономики Респ. Беларусь от 04.10.2017 № 33/23 // КонсультантПлюс. Беларусь / ООО «ЮрСпектр», Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2017.
19. Лапченко, Д. А. Система показателей комплексного анализа производственно-хозяйственной деятельности энергетических предприятий / Д. А. Лапченко // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 15-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2017. Т. 1. С. 155.

Поступила 26.03.2019 Подписана в печать 28.05.2019 Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Shniper R. I. (1996) *Region. Diagnostics and Forecasting*. Novosibirsk, Institute of Economics and Industrial Engineering, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. 134 (in Russian).
2. Dmitrieva O. G. (1992) *Regional Economic Diagnostics*. St. Petersburg, Saint Petersburg State University of Economics. 272 (in Russian).
3. Tsaregradskaya A. S., Popovichenko I. V. (2010) *Tasks and Stages of Economic Diagnostics of the Enterprise Activities* [Electronic resource]. Available at: http://rusnauka.com/5_PNW_2010/Economics/58887.doc.htm. (Accessed 8 February 2019) (in Russian).
4. *The Big Economic Dictionary*. Available at: https://big_economic_dictionary.academic.ru. (Accessed 8 February 2019) (in Russian).
5. Nesterenko E. G., Kudrina N. Yu. (2013) Assessment of Economic Security of Domestic Automobile Manufacturers in the Context of Strengthening Economic Integration. *Vestnik of Samara State University of Economics = Vestnik of Samara State University of Economics*, 110 (12), 39–42 (in Russian).
6. Zelenskaya S. G. (2007) Investment Potential: Methods of Diagnostics of Economic Development of Regions. *InVestRegion*, (2), 35–37 (in Russian).
7. Eikhler L. V., Gavrilenko N. G. (2007) *Diagnostics of Economic Condition of the Enterprises on Maintenance and Repair of Cars in the System of Anti-Crisis Management*. Omsk, The Siberian State Automobile and Highway University (SIBADI) Publ. 108 (in Russian).
8. Rodionova N. V. (2001) *Anti-Crisis Management*. Moscow, YuNITI-DANA Publ. 223 (in Russian).

9. Savitskaya G. V. (2019) *Analysis of Efficiency and Risks of Business Activity: Methodological Aspects*, 2nd ed. Moscow, INFRA-M Publ. 291 (in Russian).
10. Smol'skii A. P. (2018) *Anti-Crisis Management*. Minsk, Amalfeya Publ., Misanta Publ. 351 (in Russian).
11. Arinichev I. V., Matveeva L. G., Arinicheva I. V. (2018) Forecasting Bankruptcy of the Organization on the Basis of Metric Methods of Data Mining. *Voprosy Regulirovaniya Ekonomiki = Journal of Economic Regulation*, 9 (1), 61–73 (in Russian).
12. Lapchenko D. A., Mantserova T. F., Tymul' E. I. (2017) *Analysis of Production and Economic Activity of the Enterprise*. Minsk, BNTU. 278 (in Russian).
13. *National Standard of Accounting and Reporting "Consolidated Financial Statements"*: Resolution of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus of June 30, 2014, No 46. Available at: http://minfin.gov.by/upload/accounting/acts/postmf_300614_46.pdf (in Russian).
14. *National Standard of Accounting and Reporting "Accounting Policy of the Organization, Changes in Accounting Estimates, Errors"*: Resolution of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus of December 10, 2013, No 80. Available at: http://minfin.gov.by/upload/accounting/acts/postmf_101213_80.pdf (in Russian).
15. Burtseva M. N., Zharkikh Yu. S. Problems of Rapid Diagnosis of the Crisis State of the Enterprise. *Nauchnye Zapiski OrelGIET = Scientific Journal of OrelSIET*, 2012, 5 (1), 255–259 (in Russian).
16. Mantserova T. F. (2015) Express Diagnostics as an Effective Method of Analysis. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 13-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science – to Education, Production, Economy: Materials of the 13th International Scientific-and-Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 122–123 (in Russian).
17. Mantserova T. F., Lapchenko D. A. Express Diagnostics as an Effective Method of Analysis in Crisis Management. *Modernizatsiya Khozyaistvennogo Mekhanizma Skvoz' Prizmu Ekonomicheskikh, Pravovykh, Sotsial'nykh i Inzhenernykh Podkhodov: Sb. Mater. X Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 30 Marta 2017 g. T. 1* [Modernization of Economy Management Through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineer Approaches: Collected Materials of the XII International Scientific-and-Practical Conference, November 22, 2018. Vol. 1]. Minsk, Belarusian National Technical University, 157–159. (in Russian).
18. *On the Approval of the Instruction about the Order of Calculation of Coefficients of Solvency and Carrying out the Analysis of Financial Condition and Solvency of Subjects of Management*: the Resolution of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, Ministry of Economy of the Republic of Belarus, 27 Dec. 2011, No 140/206: in Wording of the Decree of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus, Ministry of Economy of the Republic of Belarus of 04.10.2017, No 33/23. Accessed from the Reference Retrieval System “Konsul'tant-Plyus” Belarus. Minsk, 2017 (in Russian).
19. Lapchenko D. A. (2017) System of Indicators of the Complex Analysis of Production and Economic Activity of the Power Enterprises. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 15-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science – to Education, Production, Economy: Materials of the 15th International Scientific-and-Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 155 (in Russian).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>

УДК 338

Современные методы планирования энергосистемы города

Т. М. Бугаева¹⁾, О. В. Новикова¹⁾

¹⁾Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Знания о характере изменения энергетической нагрузки не только во времени, но и в пространстве позволят добиться оптимальной структуры источников энергии в городе и тем самым сократить непроизводительные расходы энергоресурсов и повысить энергоэффективность. Изменение парадигмы развития систем энергоснабжения в сторону развития малой распределенной энергетики, интеллектуализации, управления спросом требует более точного понимания планируемых локальных нагрузок на территории города. В настоящее время получение таких данных все еще затруднительно, требует анализа многих источников и, следовательно, занимает немало времени. В статье описан возможный алгоритм формирования пространственно-временного профиля потребления энергоресурсов. В основе дезагрегирования нагрузки лежит пространственное распределение потребителей по территории города, оцениваемое с помощью плотности распределения площади зданий групп потребителей энергоресурсов. Размерность модели не ограничена как во временном, так и в пространственном разрешении: модель является гибкой и может быть адаптирована к различным случаям и местным условиям. Предложенный алгоритм применен к моделированию профиля потребления электрической энергии Санкт-Петербурга. В основе профиля – годовой график потребления электрической энергии в почасовом разрезе (8760 значений). Пространственное разрешение модели составляет от сотен метров до нескольких километров и зависит только от наличия исходных данных. В приведенном примере в качестве пространственной единицы используется деление территории города на административные районы (18 районов в Санкт-Петербурге). Полученные результаты показали свою логичность и соответствие эмпирическим наблюдениям.

Ключевые слова: энергетическая система города, профиль нагрузки, пространственно-временной профиль потребления электрической энергии

Для цитирования: Бугаева, Т. М. Современные методы планирования энергосистемы города / Т. М. Бугаева, О. В. Новикова // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-377-387>

Modern Methods of Urban Energy System Planning

Т. М. Bugaeva¹⁾, О. V. Novikova¹⁾

¹⁾Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. Knowledge of the nature of the energy load alterations not only in time, but also in space will allow achieving the optimal structure of energy sources in the city and thereby reducing unproductive energy costs of energy resources and increasing energy efficiency. Changing

Адрес для переписки

Бугаева Татьяна Михайловна
Санкт-Петербургский политехнический
университет Петра Великого
ул. Политехническая, 29
195251, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
Тел.: +7 812 297-09-72
bugaeva@spbstu.ru

Address for correspondence

Bugaeva Tatiana M.
Peter the Great St. Petersburg
Polytechnic University
29 Polytechnicheskaya str.,
195251, Saint Petersburg, Russian Federation
Tel.: +7 812 297-09-72
bugaeva@spbstu.ru

the paradigm of power supply systems development towards the development of small distributed power production, intellectualization and demand management requires a more accurate understanding of the planned local loads in the city. At present it is still difficult to obtain such data; it requires analysis of many sources and, consequently, takes a lot of time. The article presents a possible algorithm of formation of the space-time profile of energy resources consumption. At the heart of the load disaggregation there is a spatial distribution of consumers in the city, estimated by the density of the distribution area of buildings of energy consumer groups. The dimension of the model is not limited in both temporal and spatial resolution: the model is flexible and can be adapted to different cases and local conditions. The proposed algorithm has been applied to the modeling of the profile of electricity consumption in St. Petersburg. The profile is based on an annual graph of electricity consumption by hour (8760 values). The spatial resolution of the model ranges from hundreds of meters to several kilometers and depends only on the availability of initial data. In the example, the division of the city territory into administrative districts (18 districts of St. Petersburg) is used as a spatial unit. The obtained results showed their logicity and compliance with empirical observations.

Keywords: urban energy system, load profile, space-time electricity load profiles

For citation: Bugaeva T. M., Novikova O. V. (2019) Modern Methods of Urban Energy System Planning. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 377–387. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-62-4-377-387> (in Russian)

Введение

В последние десятилетия огромное количество исследований посвящено проблеме развития городских энергетических систем. Например, в [1] приводится более 200 ссылок на научные исследования, посвященные различным аспектам этой проблемы. Актуальность тематики обусловлена как ростом количества городов в мире, так и повышением концентрации населения в них. По оценкам ООН, более 2/3 энергии в мире потребляется в городах. Исторически формируемые схемы электро- и теплоснабжения потребителей жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и промышленности городов имеют индивидуальные особенности, обусловленные развитием технологий, ресурсной базой конкретного региона и инновационностью подходов городского управления.

Рост и изменение структуры потребления энергии в мегаполисах бросает вызов системе энергоснабжения городов. Прогноз потребления энергии определяет возможности, в рамках которых будут ставиться реалистичные задачи планирования развития системы энергоснабжения.

Условия развития систем энергоснабжения в мире и России меняются, что ведет к распространению малой распределенной энергетики, в том числе и в крупных городах [2]. Изменение парадигмы развития систем энергоснабжения делает особенно актуальной задачу пространственного представления информации о потреблении энергии на территории города.

Чтобы лучше понять работу энергетических систем городов, необходимо иметь подробную информацию о распределении потребления электрической и тепловой энергии как в пространстве, так и во времени. Моделирование влияния ряда факторов на динамику и режим потребления электрической энергии и теплоты представляет собой нетривиальную задачу и имеет практическую значимость. Подробные пространственно-временные данные об использовании энергоресурсов позволяют лучше планиро-

вать крупномасштабное производство возобновляемой энергии и операции с интеллектуальными сетями.

Уровень энергопотребления города зависит от таких факторов, как численность населения, уровень социально-экономического развития, от размера и структуры города (архитектурно-планировочных решений, типа застройки, транспортной оснащённости), хозяйственной специализации (добывающая, обрабатывающая промышленность, сфера услуг), состояния объектов ЖКХ и т. д.

Как правило, энергопотребители размещены в плане города неравномерно, в результате чего город в целом и его отдельные промышленно-селитебные образования различны по конфигурации, структуре и плотности энергонагрузок. Знания о характере изменения энергетической нагрузки не только во времени, но и в пространстве позволят добиться оптимальной структуры источников энергии в городе и тем самым сократить непроизводительные расходы энергоресурсов, повысить энергоэффективность. Авторами предложен алгоритм, который можно использовать для оценки пространственного распределения потребления энергии в городе.

Обзор литературы

Проектирование энергосистем независимо от их масштаба начинается со сбора исходных данных о спросе на энергоресурсы – с графиков нагрузок [3, 4]. Профилем нагрузки или профилем потребления называют матрицу, содержащую информацию о потреблении электрической (тепловой) энергии за каждый час рассматриваемого периода. В моделях городских энергетических систем появляется необходимость оценки распределения потребления энергоресурсов в пространстве, по территории города [5, 6]. Профиль, дающий не только временное, но и пространственное представление о потреблении энергоресурсов, называется пространственно-временным.

В соответствии с [7] гарантирующие поставщики электрической энергии России обязаны публиковать данные о почасовых значениях суммарного профиля потребления электрической энергии с оптового и розничного рынков. Такие профили охватывают большие площади, часто всю территорию, обслуживаемую каждой из компаний. Поэтому профили не имеют конкретной пространственной информации. Благодаря развитию интеллектуальных счетчиков электрической и тепловой энергии собираются все большие объемы подробных данных временных измерений. Эти данные в настоящее время в основном используются для выставления счетов [8]. Существует заметный интерес к интеграции геоинформационных систем и систем учета энергоресурсов для создания подробных пространственно-временных профилей спроса [9].

Реалистичное представление пространственно-временных изменений спроса является сложной задачей и требует анализа данных из разных, не обязательно связанных с энергетикой, источников. Можно выделить два

типа подходов: сверху вниз и снизу вверх. Нисходящий подход использует макроэкономические агрегированные в пространстве или во времени данные. Этот подход приводит к грубому описанию профилей спроса и состава потребителей энергоресурсов. Восходящий подход опирается на исторические (типология и возраст здания) и инженерные данные (физическое описание потребления энергии на уровне устройства) [10]. Данный подход – предпочтительный вариант для моделей энергетических систем городского масштаба, поскольку приводит к подробному описанию пространственно-временных изменений спроса [10]. Однако для этого требуются большие наборы данных, которые не являются общедоступными. В частности, нередко отсутствует информация о пространственном распределении потребителей энергоресурсов по районам города [11, 12].

Описание алгоритма формирования пространственно-временного профиля потребления электрической энергии

Для реализации модели формирования пространственно-временного профиля города необходим годовой график электрической нагрузки города. Годовой график почасовых значений потребляемой мощности города в модели является композицией годовых графиков трех групп потребителей (сектор услуг, коммунально-бытовое потребление, промышленность). В каждой группе потребителей можно выделить подгруппы в соответствии с функциональным назначением зданий и сооружений. Например, в группе «коммунально-бытовое потребление» можно выделить многоквартирные и индивидуальные жилые здания и т. п.

Особенности землепользования и структура города формируют пространственное распределение потребления энергии. Каждую группу и подгруппу потребителей энергии можно описать с помощью пространственных характеристик (плотность населения, площади зданий разного типа и т. п.).

Также для расчетов по модели необходимы данные о ежегодном потреблении электрической (тепловой) энергии каждой группой и подгруппой потребителей (МВт·ч/год). Если такие показатели отсутствуют, можно использовать известные данные об интенсивности потребления энергии (МВт·ч/(м²·год)) и о площади зданий (м²).

Для того чтобы учесть особенности суточных графиков каждой группы потребителей, в модели применяются типовые профили нагрузок разных групп и подгрупп. В рассматриваемой модели под типовыми профилями нагрузки понимается характерное для группы потребителей почасовое распределение величины потребленной энергии (электрической, тепловой) за год (сутки, месяц). Типовой профиль нагрузки представляет собой график-гистограмму, столбцы которого характеризуют долю энергии, потребленной в каждый конкретный час суток. Подробный анализ методов формирования типовых профилей нагрузки для групп потребителей приве-

ден в [13]. Однако необходимо отметить, что в настоящий момент наблюдается дефицит современных научно-практических исследований по формированию типовых профилей нагрузки.

Шаг 1. Оценка и корректировка профилей нагрузки основных групп потребителей.

Профиль нагрузки $P_i(t)$ i -й группы потребителей можно получить по следующей формуле:

$$P_i(t) = W_i f_i(t), \quad (1)$$

где W_i – годовой объем потребления энергии (МВт·ч/год) i -й группы; $f_i(t)$ – соответствующий типовой (базовый) профиль нагрузки ($\sum f_{ii}(t) = 1$).

Тогда профиль нагрузки города можно получить суммированием профилей (графиков нагрузки) потребителей

$$P_i(t) = \sum_1^3 P_i(t). \quad (2)$$

Если известен фактический годовой график нагрузки городской энергосистемы, то уравнение (1) необходимо скорректировать с помощью коэффициента $s(t)$, который рассчитывается для каждого периода времени:

$$s(t) = \frac{P_{\text{города}}(t)}{\sum W_i f_i(t)} \forall t, \quad (3)$$

где $P_{\text{города}}(t)$ – фактический (прогнозный) профиль нагрузки города.

Чтобы соответствовать фактическому значению потребления, уравнение (1) может быть переписано в следующем виде:

$$P_i(t) = s(t) W_i f_i(t). \quad (4)$$

Шаг 2. Выделение нагрузки подгрупп потребителей $P_{ik}(t)$.

Рассмотрим отдельно каждую группу потребителей. Предположим, что пространственное распределение (x, y) потребителей этой группы можно описать, зная площади зданий различного функционального назначения и их местоположение на территории города (в качестве альтернативы может быть использовано пространственное распределение населения). Профили групп потребителей в (1) могут быть разделены на более конкретные подгруппы, площади зданий которых известны:

$$P_{ik}(t) = \frac{P_i(t)}{\sum_l A_l I_l f_l(t)} A_k I_k f_k(t), \quad (5)$$

где I_k – энергоемкость подгруппы k (МВт·ч/год/м²); $f_k(t)$ – типовой профиль; A_k – общая площадь зданий, относящихся к подгруппе k ,

$$A_k = \int_x \int_y a_k(x, y) dx dy; \quad (6)$$

$a_k(x, y)$ – плотность распределения площади зданий подгруппы k (м²/км²); дробная часть в (5) – коэффициент корректировки (масштабирования), который обеспечивает равенство фактического потребления городской энер-

госистемы $P_{\text{города}}(t)$ и нагрузки, полученной агрегированием потребления выделенных подгрупп.

Шаг 3. Формирование пространственно-временного профиля нагрузки подгруппы $P_{ik}(x, y, t)$.

Далее профили нагрузки подклассов $P_{ik}(t)$ преобразуются в пространственно-временную форму с помощью показателя плотности распределения площади зданий подгруппы k : $a_k(x, y)$. Профиль нагрузки в точке с координатами (x, y) можно записать в виде

$$P_{ik}(x, y, t) = \frac{a_k(x, y)}{A_k} P_{ik}(t). \quad (7)$$

Шаг 4. Формирование пространственно-временного профиля нагрузки города.

Общий профиль потребления энергии в точке с координатами (x, y) в момент времени t получается из уравнения (7) путем агрегирования профилей групп потребителей i и подклассов k

$$P(x, y, t) = \sum_i \sum_k P_{ik}(x, y, t). \quad (8)$$

Апробация модели на примере Санкт-Петербурга

Исходные данные. Санкт-Петербург – самый северный в мире город-миллионник. Площадь собственно городской территории 605,8 км², с пригородами – 1439 км². Население – более 5 млн чел.

Территориальное планирование города осуществляется посредством разработки и утверждения Генерального плана Санкт-Петербурга и внесения в него изменений. Порядок использования территорий, запланированных Генеральным планом Санкт-Петербурга для развития на прогнозируемый период, определяется Правилами землепользования и застройки Санкт-Петербурга.

Санкт-Петербург является одним из крупных потребителей энергии в Северо-Западном регионе. В 2016 г. на территории города было потреблено более 24 млрд кВт·ч электрической энергии, около 40 млн Гкал. Основные конечные потребители топливно-энергетических ресурсов – население и сфера услуг – более 50 % в сумме. На долю промышленности в структуре конечного потребления ЕТЭБ приходится в среднем 33,0 %, транспорта – 12,5 %. Остальные сектора составляют менее 1,0 % в совокупности.

Санкт-Петербург состоит из 18 административных районов. Статистические данные о численности населения, жилой и нежилой площади, функциональном назначении и типах застройки по районам города доступны из официальных публикаций территориального органа Федеральной службы государственной статистики по Санкт-Петербургу [14], профильных комитетов администрации города. Распределение жилой площади и площади зданий общественно-делового назначения по территории города показано на рис. 1.

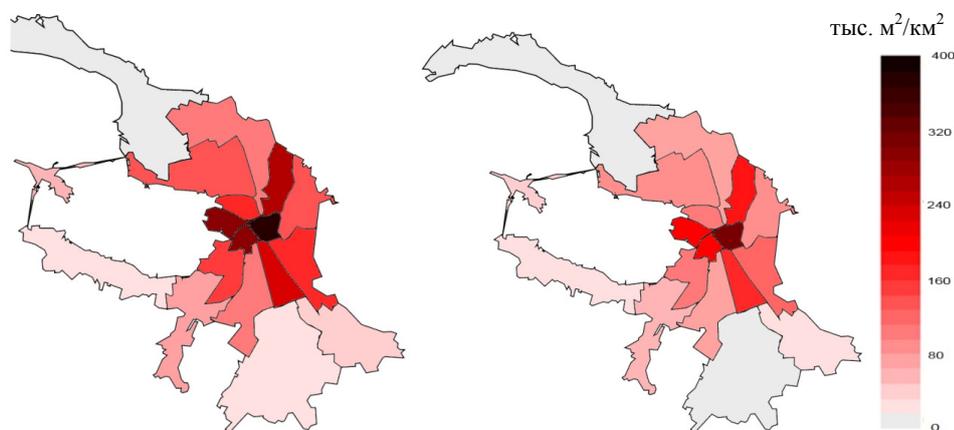


Рис. 1. Распределение жилой площади и площади зданий общественно-делового назначения по территории Санкт-Петербурга

Fig. 1. Distribution of living space and area of buildings for public and business purposes along the territory of St. Petersburg

Годовой график почасовых значений потребляемой электрической мощности (профиль нагрузки $P_{\text{города}}(t)$) Санкт-Петербурга, который требуется дезагрегировать по территориальному признаку, приведен на рис. 2.

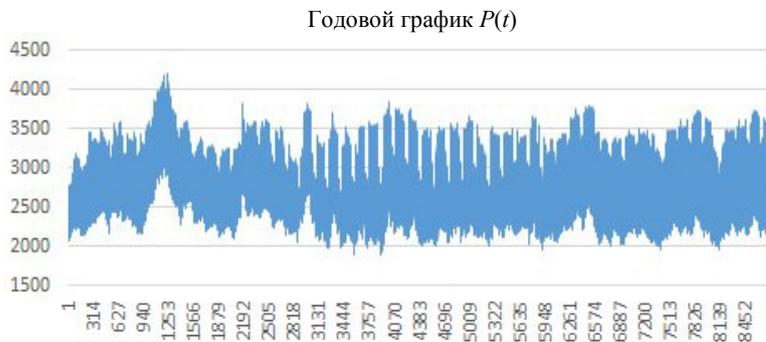


Рис. 2. Годовой профиль электрической нагрузки Санкт-Петербурга

Fig. 2. Annual profile of electric load of St. Petersburg

Деление на подгруппы основано на типологии жилого и нежилого фонда (табл. 1). Так, группа «промышленность» включает складские помещения и площади промышленных предприятий; «сфера услуг» – подгруппы: здравоохранение, образование, учреждения (офисы), торговые и досуговые предприятия, транспортные предприятия (электрифицированный транспорт). Группа «население» разбита на две подгруппы: проживающие в многоквартирных домах и в коттеджах (в том числе таунхаусы). Принятые в расчетах значения удельного потребления энергии приведены в табл. 2.

Типовые профили электрических нагрузок разных групп потребителей взяты из [15]. Типовые профили основных групп потребителей показаны на рис. 3. Пиковая нагрузка группы «население» – вечером и в выходные дни, групп «промышленность» и «сфера услуг» – около полудня в рабочие дни.

Таблица 1

Группы и подгруппы потребителей энергии (здания)
Groups and sub-groups of energy consumers (buildings)

Группа потребителей	Население	Сфера услуг	Промышленность
Подгруппы потребителей	Многоквартирные Коттеджи	Офисные Торговые Здравоохранение Образование Транспорт Досуговые	Производственные Складские

Таблица 2

Удельное потребление электроэнергии зданиями
Specific energy consumption by buildings

Тип зданий	Удельное потребление электроэнергии, кВт·ч/м ²	Доля в общей площади города, %
Многоквартирные	40	43
Коттеджи	45	9
Всего	–	52
Учрежденческие	86	6
Коммерческие	93	11
Здравоохранение	96	3
Образование	74	4
Транспорт	95	3
Культурно-досуговые	90	3
Всего	–	27
Производственные	73	13
Складские	30	5
Всего	–	18

Результаты. По описанному выше алгоритму был рассчитан профиль электрической нагрузки Санкт-Петербурга, который представляет собой матрицу с 18 (x, y)×8760 значениями.

Фрагмент профиля электрической нагрузки Санкт-Петербурга показан на рис. 4. В центральных районах города плотность электрической нагрузки на квадратный километр больше, чем в периферийных, что связано с особенностями пространственно-функциональной структуры города.

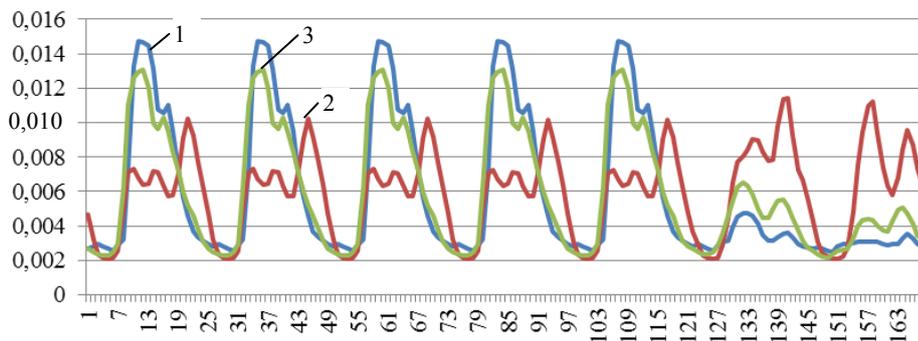


Рис. 3. Примеры типовых профилей потребления электрической энергии для Санкт-Петербурга: 1 – промышленность; 2 – население; 3 – сфера услуг

Fig. 3. Examples of typical electricity consumption profiles for St. Petersburg: 1 – industry; 2 – population; 3 – services

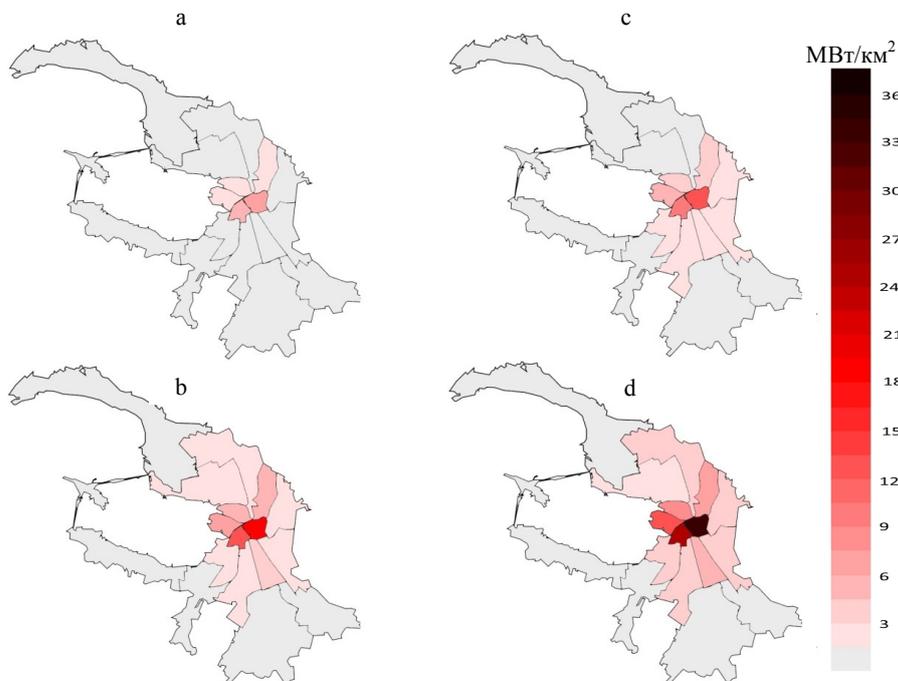


Рис. 4. Фрагмент профиля потребления энергии в Санкт-Петербурге: а – 3:00; б – 12:00; с – 17:00; д – максимум нагрузки

Fig. 4. A fragment of the profile of energy consumption in St. Petersburg: а – 3:00; б – 12:00; с – 17:00; д – maximum load

ВЫВОДЫ

1. Данные об уровне потребления энергоресурсов как во временном, так и в пространственном разрезе необходимы при планировании развития энергетического комплекса города. Наличие такой информации позволит

провести подробный анализ городской энергетической системы в масштабе города или в пределах одного района (квартала). Особенно очевидна полезность таких данных при внедрении технологий Smart Grid и разработке мер по управлению спросом. Изменяя масштаб зонирования (район, муниципальный округ, квартал) и временной интервал (год, неделя, сутки, час) возможно адаптировать модель согласно конкретным задачам и условиям (наличие исходных данных).

2. Многофакторный анализ может дополнить и повысить точность среднесрочного и долгосрочного планирования объемных и пространственных характеристик модели. Так, одновременное влияние увеличения площади жилых зданий и повышения энергетической эффективности существующих и вводимых объектов может увеличивать и уменьшать объемы потребления с разными темпами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Keirstead, J. A Review of Urban Energy System Models: Approaches, Challenges and Opportunities / J. Keirstead, M. Jennings, A. Sivakumar // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, No 6. P. 3847–3866.
2. Бушуев, В. В. Энергоэффективный мегаполис-Smart City «Новая Москва» / В. В. Бушуев, П. А. Ливинский. М.: Энергия, 2015.
3. Методические основы разработки перспектив развития электроэнергетики / А. А. Макаров [и др.]. М.: Институт энергетических исследований РАН, 2007. 103 с.
4. Mirakyan, A. Integrated Energy Planning in Cities and Territories: a Review of Methods and Tools / A. Mirakyan, R. De Guio // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013. Vol. 22. P. 289–297.
5. Spatial Distribution of Urban Building Energy Consumption by End Use / B. Howard [et al.] // *Energy and Buildings*. 2012. Vol. 45. P. 141–151.
6. Mikkola, J. Models for Generating Place and Time Dependent Urban Energy Demand Profiles / J. Mikkola, P. D. Lund // *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 256–264.
7. Правила определения стоимости электрической энергии (мощности), поставляемой на розничном рынке по регулируемым ценам (тарифам), оплаты отклонений фактических объемов потребления от договорных, а также возмещения расходов в связи с изменением договорного объема потребления электрической энергии [Электронный ресурс]: приложение к приказу ФСТ России от 21.08.2007 № 166-э/1 (в ред. приказов ФСТ России от 03.07.2008 № 249-э, от 29.05.2009 № 103-э/1) // КонсультантПлюс. Россия. М., 2009.
8. Chicco, G. Overview and Performance Assessment of the Clustering Methods for Electrical Load Pattern Grouping / G. Chicco // *Energy*. 2012. Vol. 42, No 1. P. 68–80.
9. Enterprise Integration Solution for Power Supply Company Based on GeoNis Interoperability Framework / L. Stoimenov [et al.] // *Data & Knowledge Engineering*. 2016. Vol. 105. P. 23–38.
10. Fonseca, J. A. Integrated Model for Characterization of Spatiotemporal Building Energy Consumption Patterns in Neighborhoods and City Districts / J. A. Fonseca, A. Schlueter // *Applied Energy*. 2015. Vol. 142. P. 247–265.
11. Andersen, F. M. Long-Term Forecasting of Hourly Electricity Load: Identification of Consumption Profiles and Segmentation of Customers / F. M. Andersen, H. V. Larsen, T. K. Boomsma // *Energy Conversion and Management*. 2013. Vol. 68. P. 244–252.
12. Differentiated Long Term Projections of the Hourly Electricity Consumption in Local Areas. The Case of Denmark West / F. M. Andersen [et al.] // *Applied Energy*. 2014. Vol. 135. P. 523–538.

13. Туркина, О. В. Разработка методов повышения обоснованности и достоверности расчета и анализа фактических потерь и балансов электрической энергии в электрических сетях. М.: ОАО «НТЦ электроэнергетики», 2011. 27 с.
14. Санкт-Петербург в 2016 году. СПб.: Петростат, 2017. 206 с.
15. BDEW. Standardlastprofile_2016 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>. Дата доступа: 10.11.2017.

Поступила 19.03.2019 Подписана в печать 28.05.2019 Опубликовано онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Keirstead J., Jennings M., Sivakumar A. (2012) A Review of Urban Energy System Models: Approaches, Challenges and Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (6), 3847–3866. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.047>.
2. Bushuev V. V., Livinskii P. A. (2015) *Energy-Efficient Megapolis – Smart City “New Moscow”*. Moscow, Energiya Publ. 75 (in Russian).
3. Makarov A. A., Veselov F. V., Volkova E. A., Makarova A. S. (2007) *Methodical Bases of Development of Elaboration of Prospects of Electric Power Industry Development*. Moscow, Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences. 103 (in Russian).
4. Mirakyan A., De Guio R. (2013) Integrated Energy Planning in Cities and Territories: a Review of Methods and Tools. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 289–297. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.01.033>.
5. Howard B., Parshall L., Thompson J., Hammer S., Dickinson J., Modi V. (2012) Spatial Distribution of Urban Building Energy Consumption by End Use. *Energy and Buildings*, 45, 141–151. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.061>.
6. Mikkola J., Lund P. D. (2014) Models for Generating Place and Time Dependent Urban Energy Demand Profiles. *Applied Energy*, 130, 256–264. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.039>.
7. *Rules of Determination of Cost of the Electric Energy (Power) Delivered in the Retail Market at the Regulated Prices (Rates), Payment of Deviations of the Actual Volumes of Consumption from Contractual, and also Compensation of Expenses in Relation with Alteration of Contractual Volume of Consumption of Electric Energy*: Appendix to the Order of FTS of Russia of 21.08.2007 No 166-э/1 (in the Wording of FTS of Russia Orders of 03.07.2008 N 249-э, of 29.05.2009 No 103-э/1). Accessed from the Reference Retrieval System “Kon-sultantPlyus” Russia. Moscow, 2009 (in Russian).
8. Chicco G. (2012) Overview and Performance Assessment of the Clustering Methods for Electrical Load Pattern Grouping. *Energy*, 42 (1), 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.12.031>.
9. Stoimenov L., Davidovic N., Stanimirovic A., Bogdanovic M., Nikolic D. (2016) Enterprise Integration Solution for Power Supply Company Based on GeoNis Interoperability Framework. *Data & Knowledge Engineering*, 105, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.datak.2015.10.001>.
10. Fonseca J. A., Schlueter A. (2015) Integrated Model for Characterization of Spatiotemporal Building Energy Consumption Patterns in Neighborhoods and City Districts. *Applied Energy*, 142, 247–265. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.068>.
11. Andersen F. M., Larsen H. V., Boomsma T. K. (2013) Long-Term Forecasting of Hourly Electricity Load: Identification of Consumption Profiles and Segmentation of Customers. *Energy Conversion and Management*, 68, 244–252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.01.018>.
12. Andersen F. M., Larsen H. V., Juul N., Gaardstrup R. B. (2014) Differentiated Long Term Projections of the Hourly Electricity Consumption in Local Areas. The Case of Denmark West. *Applied Energy*, 135, 523–538. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.075>.
13. Туркина О. В. (2011) *Development of Methods to Improve the Validity and Reliability of the Calculation and Analysis of Actual Losses and Balances of Electrical Energy in Electrical Networks*. Moscow, “STC of Electric Power Industry” JSC. 27 (in Russian).
14. *St. Petersburg in 2016*. (2017) St. Petersburg, Petrostat Publ. 206 (in Russian).
15. BDEW. Standardlastprofile_2016. Available at: <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>. (Accessed 10 November 2017).

<https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>

УДК 338.27

Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь

Е. П. Корсак¹⁾

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

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. Энергетика Республики Беларусь является одной из ключевых отраслей национальной экономики, эффективное развитие которой обеспечивает работу всего реального сектора экономики и сферы жилищно-коммунального хозяйства. Ввиду отсутствия в необходимом количестве собственных энергетических ресурсов страна подвержена влиянию факторов внутренних и внешних угроз, которые формируют энергетическую зависимость республики от поставок топливно-энергетических ресурсов извне, что ослабляет ее энергетическую безопасность. Основной страной – импортером топливно-энергетических ресурсов для Беларуси является Российская Федерация. В этой связи требует уточнения понятие энергетической безопасности с учетом внешних и внутренних угроз. В статье рассмотрены теоретические подходы к определению понятия энергетической безопасности, отмечены специфические особенности для стран-импортеров и стран-экспортеров. Уточнены основные угрозы энергетической безопасности для Республики Беларусь, выявлены причины их возникновения и последствия – как для предприятий топливно-энергетического комплекса, так и для потребителей энергии. Для определения уровня энергетической безопасности наиболее оптимальным является индикативный метод оценки, который подразумевает собой выделение параметров и показателей развития и функционирования топливно-энергетического комплекса, его подсистем и объектов, а также потребителей энергии, характеризующих состав, глубину и территориальные рамки реализации угроз энергетической безопасности, ее уровень. Проанализированы в динамике индикаторы основных направлений энергетической безопасности, определены их уровни по периодам. Выделены направления энергетической безопасности, которые в наибольшей и наименьшей степени подвержены угрозам. Предложен комбинированный подход для определения объектов энергетической безопасности. Дано авторское определение энергетической безопасности.

Ключевые слова: энергетическая безопасность, топливно-энергетический комплекс, топливно-энергетические ресурсы, внешние и внутренние угрозы, индикаторы энергетической безопасности

Для цитирования: Корсак, Е. П. Формирование системы угроз энергетической безопасности Республики Беларусь / Е. П. Корсак // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ*. 2019. Т. 62, № 4. С. 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-4-388-398>

Адрес для переписки

Корсак Екатерина Павловна
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

Address for correspondence

Korsak Ekaterina P.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-75-35
eoe@bntu.by

Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus

E. P. Korsak¹⁾

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

Abstract. The energy sector of the Republic of Belarus is one of the key sectors of the national economy, the effective development of which ensures the operation of the entire real economy and the sphere of housing and communal services. Due to the lack of the necessary amount of its own energy resources, the country is affected by factors of internal and external threats that form the energy dependence of the Republic on the supply of fuel and energy resources from outside. This weakens its energy security. The main importing country of fuel and energy resources for the Republic of Belarus is the Russian Federation. In this regard, the concept of energy security needs to be clarified, taking into account external and internal threats. The article deals with theoretical approaches to the definition of energy security, the specific features for the importing and exporting countries. The main threats to energy security for the Republic of Belarus are clarified, the causes of their occurrence and consequences for both fuel and energy complex enterprises and energy consumers are revealed. To determine the level of energy security, the indicative assessment method, which involves the identification of parameters and indicators of the development and functioning of the fuel and energy complex, its subsystems and facilities, as well as energy consumers, is the most optimal. These parameters characterize the composition, depth and territorial framework for the implementation of threats to energy security, its level. The indicators of the main directions of energy safety have been analyzed in dynamics; their levels are determined by periods. The directions of energy security, which are most and least susceptible to threats, have been identified. A combined approach for determining the objects of energy security is proposed. The author's definition of energy security is presented.

Keywords: energy security, fuel and energy complex, fuel and energy resources, external and internal threats, energy security indicators

For citation: Korsak E. P. (2019) Formation of the System of Threats to Energy Security of the Republic of Belarus. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 62 (4), 388–398. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-62-4-388-398> (in Russian)

Введение

В современных условиях вопросы обеспечения энергетической безопасности играют ключевую роль. Данные международных статистических исследований показывают, что при существующих темпах по добыче и потреблению топлива таких ключевых природных запасов, как нефть и природный газ, хватит на 50–60 лет. Ряд стран имеют избыток перечисленных природных ресурсов. Эти государства в основном являются экспортерами для стран с низкой обеспеченностью собственными первичными энергетическими ресурсами. Следует отметить, что как для стран-импортеров, так и для стран-экспортеров остается актуальным вопрос обеспечения высокого уровня безопасности в контексте повышения ее компонентов, а именно – экономической, энергетической, военной и ряда других.

Понятие «безопасность» по толковому словарю С. И. Ожегова трактуется как «состояние, при котором не угрожает опасность, есть защита от опасности» [1]. В этой связи обеспечение национальной безопасности является приоритетной задачей государства.

Возникает главный вопрос – рассматривать энергетическую безопасность страны как самостоятельную составляющую, или как часть экономической и экологической сфер? В этом случае существует ряд подходов. Американский исследователь Д. Ергин трактует энергетическую безопасность следующим образом: «Это... система, состоящая из национальной политики и международных институтов, задача которых – скоординированно реагировать на перебои, нарушения и чрезвычайные ситуации, а также оказывать помощь в поддержании стабильного притока ресурсов» [2, с. 267].

Исходя из данного определения, можно сделать вывод, что энергетическая безопасность выступает не только как составляющая национальной, но и как компонент международной безопасности, поскольку возникают вопросы геополитического характера.

Такого же мнения придерживается А. В. Деденкулов, отмечая, что «проблема энергетической безопасности чрезвычайно многогранна. Ее объективные характеристики и субъективное восприятие зависят от степени обеспеченности страны ископаемыми видами топлива, ее географического положения, уровня жизни и социально-экономического развития, исторических и актуальных внешнеполитических реалий, состояния соответствующей инфраструктуры, пригодности природных условий для развития альтернативной энергетики, наконец, культурных и мировоззренческих особенностей местных элит» [3, с. 241].

Существуют два основных подхода к определению энергетической безопасности. Согласно первому, объектами энергетической безопасности являются только потребители энергии – на макро-, мезо- и микроуровнях. Сторонники второго подхода выделяют два основных объекта энергетической безопасности, а именно – объекты энергетики и инфраструктуру.

Согласно Концепции национальной безопасности Республики Беларусь, утвержденной Президентом Республики Беларусь от 9 ноября 2010 г. № 575, понятие «национальная безопасность» трактуется как «состояние защищенности национальных интересов Республики Беларусь от внутренних и внешних угроз» [4]. Структура национальной безопасности направлена на защищенность страны исходя из сфер жизнедеятельности общества.

Сегодня для Беларуси компонентами национальной безопасности являются следующие сферы: экономическая, социально-политическая, демографическая, научно-технологическая, информационная, военная и экологическая. Количество компонентов национальной безопасности может как увеличиваться, так и уменьшаться, в зависимости от ряда условий, которые определяют развитие государства.

Согласно концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, энергетическая безопасность определяется как «состояние защищенности граждан, общества, государства, экономики от угроз дефицита в обеспечении их потребностей в энергии экономически доступными энер-

гетическими ресурсами приемлемого качества, от угроз нарушения бесперебойности энергоснабжения» [5, с. 3].

Для условий Республики Беларусь наиболее точный – комбинированный подход, при котором объектами энергетической безопасности являются все составляющие технологического цикла – как участники процесса производства энергии, так и потребители на всех уровнях (рис. 1).

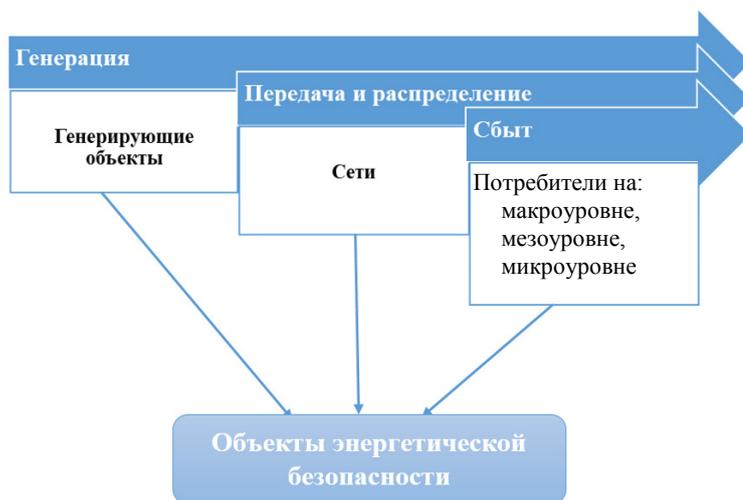


Рис. 1. Комбинированный подход к определению объектов энергетической безопасности (собственная разработка)

Fig. 1. Combined approach to definition of the objects of energy security (the author's development)

Ряд авторов выделяют следующие классификации угроз энергетической безопасности [6]:

- внешние и внутренние;
- природные и техногенные;
- связанные с неоптимальным управлением энергосистемы;
- экономические, политические, социальные и др.

В целом перечень данной классификации может корректироваться в зависимости от масштабов страны либо региона, наличия первичных источников энергии, объектов генерирующих источников и др. Для Беларуси следует разделить угрозы на внешние и внутренние, которые рассматривают как внутригосударственную защищенность, так и международные аспекты.

Общие угрозы энергетической безопасности на всех стадиях энергетической цепи Республики Беларусь систематизированы на рис. 2. Угрозы энергетической безопасности могут носить как отрицательный, так и положительный характер в зависимости от субъекта угрозы, будь то предприятие топливно-энергетического комплекса либо потребитель энергии (табл. 1).



Рис. 2. Общие угрозы энергетической безопасности Республики Беларусь на всех стадиях энергетической цепи (собственная разработка на основании [4])

Fig. 2. General threats to the energy security of the Republic of Belarus at all stages of the energy chain (the author's development on the basis of [4])

Для Беларуси выделяются общие угрозы энергетической безопасности, относящиеся ко всем стадиям энергетической цепи. По нашему мнению, их необходимо разделить на две группы, учитывающие:

- 1) инвестиционные и финансовые угрозы;
- 2) социальные угрозы.

Дефицит инвестиций в модернизацию основных производственных фондов топливно-энергетического комплекса (ТЭК) провоцирует ограниченные возможности для привлечения необходимых финансовых ресурсов организациями ТЭК, что не обеспечивает требуемый уровень обновления основного оборудования и вызывает его повышенный износ и увеличение потерь энергии на всех стадиях энергетической цепи.

Недостаточный уровень подготовки высококвалифицированных кадров для ТЭК способствует оттоку кадров в другие сферы деятельности с менее напряженным графиком работы, что повышает уровень аварийности объектов энергетики.

Обзор литературных источников по данной проблематике позволил уточнить понятие «энергетическая безопасность», определяемое как самостоятельный компонент национальной безопасности, включающий в себя состояние надежности и устойчивости деятельности участников процесса генерации, передачи, распределения энергии и потребителей на микро-, мезо- и макроуровнях от внешних и внутренних угроз [7].

Следует отметить, что основная угроза энергетической безопасности для потребителей энергии – это перебои в электроснабжении. Для предприятий ТЭК угрозы энергетической безопасности, прежде всего, выража-

ются в нестабильной работе, повышении аварийности, снижении качества энергии и т. д., что, в свою очередь, сказывается на жизнедеятельности потребителей (табл. 1).

Таблица 1

Угрозы энергетической безопасности и их последствия

Energy security threats and their consequences

Угроза энергетической безопасности	Причина возникновения угрозы	Угроза надежной работы предприятия ТЭК	Угроза для потребителей энергии
Дефицит инвестиций в модернизацию основных производственных фондов ТЭК	Низкая инвестиционная привлекательность отрасли ввиду отсутствия в достаточном объеме собственных финансовых средств и, как следствие, высокая закредитованность предприятий ТЭК	Повышение аварийности; снижение качества энергии; увеличение потерь энергии при транспортировке	Перебои в электроснабжении, нарушение производственного цикла; недоотпуск продукции; снижение доходов
Ограниченные возможности для привлечения финансирования организациями ТЭК, в том числе внешнего	Несовершенство нормативно-правовой базы, особенности организационной структуры	Снижение темпов модернизации, замены и обновления основного энергетического оборудования; рост затрат	Перебои в электроснабжении, нарушение производственного цикла; недоотпуск продукции; повышение тарифов
Недостаточно высокий уровень подготовки высококвалифицированных кадров для ТЭК	Недостаточный академический обмен опытом с передовыми специалистами в области энергетики	Нестабильная работа объектов энергетики; человеческий фактор (повышение аварийности)	Перебои в электроснабжении, нерациональное использование энергетических ресурсов
Диверсии и террористические акты (в том числе с использованием информационных технологий) на объектах энергетики	Недостаточная система охраны объектов энергетики, недостаточно высокий уровень специалистов ТЭК	Угроза нарушения технологического цикла; невыполнение обязательств перед потребителем; угроза понесенных затрат	Перебои в электроснабжении; угроза недопоставок энерго-ресурсов
Примечание. Собственная разработка автора на основании [4].			

С целью своевременного обнаружения изменений уровня угроз энергетической безопасности страны осуществляется ее мониторинг. Для определения уровня энергетической безопасности наиболее оптимальным является индикативный метод оценки, который подразумевает выделение параметров и показателей развития и функционирования топливно-энергетического комплекса, его подсистем и объектов, а также потребителей энергии, характеризующих состав, глубину и территориальные рамки реализации угроз энергетической безопасности, ее уровень.

Согласно Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь, выделяются 11 индикаторов энергетической безопасности, которые

можно объединить по направлениям, представленным в табл. 2. Выделяют следующие уровни индикаторов энергетической безопасности республики: К – критический; ПК – предкритический; Н – нормальный.

Таблица 2

Состояние защищенности по направлениям энергетической безопасности Республики Беларусь

The state of protectability in the areas of energy security of the Republic of Belarus

Наименование индикатора энергетической безопасности	Значение индикаторов по годам					
	Ретроспектива		Ближайший период	Перспектива		
	2010	2015	2020	2025	2030	2035
Энергетическая самостоятельность						
Отношение объема производства (добычи) первичной энергии к валовому потреблению ТЭР	К	К	ПК	ПК	ПК	ПК
Отношение объема производства (добычи) первичной энергии из возобновляемых источников энергии к валовому потреблению ТЭР	К	К	ПК	ПК	ПК	ПК
Диверсификация поставщиков и видов энергоресурсов						
Доля доминирующего поставщика энергоресурсов в общем импорте ТЭР	К	К	К	ПК	ПК	ПК
Доля доминирующего вида топлива в валовом потреблении ТЭР	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	Н
Надежность поставок, резервирование, переработка и распределение ТЭР						
Отношение суммарной установленной мощности электростанций к максимальной фактической нагрузке в энергосистеме (резервирование)	ПК	ПК	Н	Н	Н	Н
Удельный вес накопленной амортизации в первоначальной стоимости основных средств организации ТЭК	ПК	ПК	Н	Н	Н	Н
Отношение объема инвестиций в основной капитал, вложенных в развитие ТЭК, к первоначальной стоимости основных средств организации ТЭК	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Доля доминирующего энергоресурса (газа) в производстве тепловой и электрической энергии	К	К	ПК	ПК	Н	Н
Отношение среднесуточного количества нарушений электроснабжения населенных пунктов к общему количеству населенных пунктов	Н	Н	Н	Н	Н	Н
Энергетическая эффективность конечного потребления ТЭР и экономическая устойчивость ТЭК						
Энергоемкость ВВП (в ценах 2005 г.), кг у. т./млн руб.	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК
Отношение стоимости импорта энергетических товаров к ВВП, %	ПК	ПК	ПК	ПК	ПК	Н
Примечание. Собственная разработка на основании [4].						

Анализ состояния защищенности по направлениям энергетической безопасности Республики Беларусь показал, что менее подвержены угрозам надежность поставок, резервирование, переработка и распределение топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). В кратко- и долгосрочной перспективах все индикаторы данного направления должны соответствовать нормальному уровню.

Наиболее уязвимым направлением энергетической безопасности является энергетическая самостоятельность Республики Беларусь. До 2015 г. индикаторы находились на критическом уровне, в ближайшей краткосрочной и долгосрочной перспективах планируется их выход на предкритический уровень.

Рассмотрим более подробно блок энергетической эффективности конечного потребления ТЭР и экономической устойчивости ТЭК, а именно – показатель энергоемкости ВВП. Данный показатель может выражаться в килограммах условного топлива на миллион рублей и в процентах. Энергоемкость ВВП подразделяется на энергетическую и неэнергетическую составляющие и рассчитывается по следующей формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{ВВП}} = \mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{неэн}} + \mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{эн}}, \quad (1)$$

где $\mathcal{E}_{\text{ВВП}}$ – энергоемкость валового внутреннего продукта Республики Беларусь, кг у. т./млн руб.; $\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{неэн}}$ – неэнергетическая составляющая энергоемкости ВВП, кг у. т./млн руб.; $\mathcal{E}_{\text{ВВП}}^{\text{эн}}$ – энергетическая составляющая энергоемкости ВВП, кг у. т./млн руб.

Энергетическая составляющая отражает общий объем поставок первичной энергии и ее эквивалентов на внутренний рынок Беларуси на потребление в секторе преобразования, а неэнергетическая составляющая – на неэнергетические нужды, конечное потребление в секторах экономики с учетом потерь.

Снижение энергоемкости ВВП может свидетельствовать о том, насколько рационально используются топливно-энергетические ресурсы и эффективно выполняются энергосберегающие мероприятия. Для Республики Беларусь характерен довольно высокий показатель энергоемкости ВВП, это обусловлено рядом факторов. Основные из них:

- устаревшая материальная база и износ оборудования;
- высокий уровень потерь на стадиях технологического цикла;
- нерациональное использование ТЭР.

Динамика изменения энергоемкости ВВП и ее составляющих по годам представлена на рис. 3, 4 [8–10].

За последнее десятилетие наметилась устойчивая тенденция к снижению уровня ВВП: с 423,8 кг у. т./млн руб. в 2010 г. до 376,4 кг у. т./млн руб. в 2017-м. Наименьшее значение за указанный период энергоемкость ВВП достигла в 2015 г. – 387,7 кг у. т./млн руб. Снижение энергоемкости

ВВП было достигнуто за счет модернизации оборудования, внедрения современных энергоэффективных технологий, увеличения доли использования местных ТЭР и возобновляемых источников энергии.



Рис. 3. Энергоемкость ВВП по составляющим (ВВП в ценах 2005 г.)

Fig. 3. Energy intensity of GDP by component (GDP in presented in 2005 prices)



Рис. 4. Энергоемкость ВВП по составляющим

Fig. 4. Energy intensity of GDP by component

ВЫВОДЫ

1. Предложен комбинированный подход к определению объектов энергетической безопасности.
2. Общие угрозы энергетической безопасности Республики Беларусь систематизированы на инвестиционные, финансовые и социальные.
3. Выявлены сильные и слабые направления энергетической безопасности Беларуси, направление надежности поставок, резервирование, переработка и распределение топливно-энергетических ресурсов и соответственно энергетическая самостоятельность.

4. Конкретизировано понятие «энергетическая безопасность», под которым понимается самостоятельный компонент национальной безопасности, включающий в себя состояние надежности и устойчивости участников процесса генерации, передачи, распределения энергии и потребителей на микро-, мезо- и макроуровнях от внешних и внутренних угроз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ожегов, С. И. Толковый словарь русского языка: 80 000 слов и фразеологических выражений / С. И. Ожегов, Н. Ю. Шведова. 4-е изд. М.: Азбуковник, 1997. 944 с.
2. Yergin, D. *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World* / D. Yergin. New York: Penguin Press HC, 2011. 816 p.
3. Деденкулов, А. В. Проблемы энергетической безопасности в начале XXI века: вызовы и возможности / А. В. Деденкулов // Вестник МГИМО-Университета. Экон. и эконом. науки. 2013. Т. 28, № 1. С. 241–248.
4. Об утверждении Концепции национальной безопасности Республики Беларусь [Электронный ресурс]: Указ Президента Республики Беларусь от 9 ноября 2010 г. № 575 // Комитет государственной безопасности Республики Беларусь. Режим доступа: <http://kgb.by/ru/ukaz575/>.
5. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 23 декабря 2015 г. № 1084 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. Минск, 2015.
6. Чиж, Е. П. Энергетическая безопасность Республики Беларусь с учетом ввода БелАЭС / Е. П. Чиж // Модернизация хозяйственного механизма сквозь призму экономических, правовых, социальных и инженерных подходов: сб. материалов XIII Междунар. науч.-практ. конф., 22 ноября 2018 г. / Белорусский национальный технический университет, факультет технологий управления и гуманитаризации, кафедра «Экономика и право»; пред. редкол. С. Ю. Солодовников. Минск: БНТУ, 2018. С. 262–264.
7. Чиж, Е. П. Место и роль энергетики в национальной экономике страны / Е. П. Чиж // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 16-й Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2018. Т. 1. С. 124.
8. Национальный статистический комитет Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://belstat.gov.by/>. Дата доступа: 20.05.2019.
9. Корсак, Е. П. Перспективы развития ядерной энергетики: мировой и национальный аспект / Е. П. Корсак, Т. Ф. Манцерова // Мировая экономика и бизнес-администрирование малых и средних предприятий: материалы 15-го Междунар. науч. семинара, проводимого в рамках 17-й Междунар. науч.-техн. конф. «Наука – образованию, производству, экономике», 24–25 января 2019 г., г. Минск. Минск: Право и экономика, 2019. С. 79–80.
10. Манцерова, Т. Ф. Основные подходы к энергосбережению на предприятиях энергетики / Т. Ф. Манцерова, Е. П. Корсак // Управление в социальных и экономических системах: материалы XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., г. Минск, 16 мая 2019 г. / редкол.: Н. В. Суша (предс.) [и др.]. Минск: Минский инновационный университет, 2019. С. 44–45.

Поступила 15.04.2019 Подписана в печать 18.06.2019 Опубликована онлайн 31.07.2019

REFERENCES

1. Ozhegov S. I., Shvedova N. Yu. (1997) *Explanatory Dictionary of the Russian Language: 80.000 Words and Phraseological Expressions*, 4th ed., Moscow, Azbukovnik Publ. 944 (in Russian).
2. Yergin D. (2011) *The Quest: Energy, Security, and the Remaking of the Modern World*. New York, Penguin Press. 816.

3. Dedenkulov A. V. (2013) Problems of Environmental Safety in the Beginning of the XXI Century: Challenges and Opportunities. *Vestnik MGIMO-Universiteta. Ekon. i Ekonom. Nauki = MGIMO Review of International Relations: Economics and Economical Sciences*, 28 (1), 241–248 (in Russian).
4. On the Approval of the Conception of National Security of the Republic of Belarus: Decree of the President of the Republic of Belarus of November 9, 2010, No 575. *State Security Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <http://kgb.by/ru/ukaz575/> (in Russian).
5. Concept of Energy Security of the Republic of Belarus: Resolution of the Council of Ministers of Republic of Belarus of December 23, 2015, No 1084. *ETALON. Legislation of the Republic of Belarus*. Minsk, National Legal Information Center of the Republic of Belarus, 2015 (in Russian).
6. Chizh E. P. (2018) Environmental Security of the Republic of Belarus Taking into Account the Implementation of the Belarusian Nuclear Power Plant. *Modernizatsiya Khozyaystvennogo Mekhanizma Skvoz' Prizmu Ekonomicheskikh, Pravovykh, Sotsial'nykh i Inzhenernykh Podkhodov: Sb. Mater. XIII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., 22 Noyab. 2018 g.* [Modernization of Economy Management Through the Prism of Economic, Legal, Social and Engineer Approaches: Collected Materials of the XIII International Scientific-and-Practical Conference, Nov. 22, 2018]. Minsk, Belarusian National Technical University, 262–264 (in Russian).
7. Chizh E. P. (2018) Place and Role of Power Engineering in the National Economy. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike: Materialy 16-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. T. 1* [Science – to Education, Production, Economy: Materials of the 16th International Scientific-and-Technical Conference. Vol. 1]. Minsk, BNTU, 124 (in Russian).
8. *National Statistical Committee of the Republic of Belarus*. Available at: <http://belstat.gov.by/>. (Accessed 20 May 2019) (in Russian).
9. Korsak E. P., Mantserova T. F. (2019) Prospects for the Development of Nuclear Power Engineering: Global and National Aspects. *Mirovaya Ekonomika i Biznes-Administrirovanie Malykh i Srednikh Predpriyatii: Materialy 15-go Mezhdunar. Nauch. Seminara, Provodimogo v Ramkakh 17-i Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf. "Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike"*, 24–25 Yanvarya 2019 g., g. Minsk [World Economy and Business Administration of Small and Medium Enterprises: Proceedings of the 15th International Scientific Seminar Held Within the Framework of the 17th International. Scientific-and-Technical Conference Science – to Education, Production, Economy, 24–25 Jan. 2019, Minsk]. Minsk, Pravo i Ekonomika Publ., 79–80 (in Russian).
10. Mantserova T. F., Korsak E. P. (2019) The Main Approaches to Energy Saving in Energy Enterprises. *Upravlenie v Sotsial'nykh i Ekonomicheskikh Sistemakh: Materialy XXVIII Mezhdunar. Nauch.-Prakt. Konf., g. Minsk, 16 Maya 2019 g.* [Management in Social and Economic Systems: Proceedings of the XXVIII International Scientific-and-Practical Conference, Minsk, May 16, 2019]. Minsk, Minsk Innovative University, 44–45 (in Russian).