

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССОБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 620.9:697.273
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Поступила в редакцию 04.04.2020
Received 04.04.2020

А. П. Ахрамович¹, И. В. Войтов², В. П. Колос¹

¹*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ИНТЕГРАЦИЯ АЭС В ЭКОНОМИКУ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ.
ИНФРАКРАСНАЯ СИСТЕМА АСЛОТУ**

Аннотация. Составлен статистический массив из трех сопоставляемых величин: численности населения и удельных (из расчета на душу населения за год) валовой добавленной стоимости (УВДС) и потребления электроэнергии (УПЭ) для 50 стран с УВДС, большим или сравнимым с белорусским. Методами корреляционного анализа установлено наличие сильной положительной достоверной связи между УВДС и УПЭ. Получено, что для инновационного развития экономики Беларуси и ускоренного роста УВДС необходимо увеличить установленные электрические мощности на 20–25 %. Отмечено, что ядерная энергетика является основным ресурсом пятого технологического уклада. Решаемые при эксплуатации АЭС задачи содействуют разработке новой техники, зарождению и внедрению передовых способов производства в различных отраслях экономики. Требуемый современными технологиями микроклимат в рабочих зонах предприятий и на рабочих местах учреждений предложено обеспечивать автоматизированной системой лучистого обеспечения технологических условий – АСЛОТУ, созданной белорусскими специалистами. Приведены структура данной инфракрасной установки, принципы ее расчета и особенности алгоритма функционирования. Определены технико-экономические показатели АСЛОТУ – стоимость, продолжительность службы, трудоемкость и частота обслуживания, затраты на потребляемое топливо, срок окупаемости вложенных средств на внедрение. Отмеченные показатели получены в результате обработки данных по эксплуатации АСЛОТУ, установленных в Беларуси за период с 1997 по 2007 г. Они легли в основу проекта плана внедрения АСЛОТУ до 2035 г. Полученные результаты могут быть использованы в других странах с УВДС 4,0–15,0 тыс. долл./чел. за год, которые взяли курс на инновационное развитие экономики.

Ключевые слова: электричество, технологический уклад, добавленная стоимость, генерирующие мощности, корреляционный анализ, микроклимат в помещении, инфракрасная система, срок окупаемости, план внедрения

Для цитирования: Ахрамович, А. П. Интеграция АЭС в экономику Республики Беларусь. Инфракрасная система АСЛОТУ / А. П. Ахрамович, И. В. Войтов, В. П. Колос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 3. – С. 317–331. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Aliaksandr P. Akhramovich¹, Igor V. Voitov², Valery P. Kolos²

¹*Institute of Power Engineering of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus*

**NUCLEAR POWER STATION INTEGRATION IN THE ECONOMY OF REPUBLIC OF BELARUS.
INFRARED SYSTEM ASLOTU**

Abstract. Statistical series of economic and energy indicators had been made up according to 2017 data. It consisted of three comparable values: population and specific (capita per inhabitant in the year) gross value added (SGVA) and electricity consumption (SEC) for fifty countries, which SGVA are larger or comparable to Belarus values. Using the correlation analysis the presence of strong, positive, reliable relationship between SGVA and SEC was established. It was found, that for the innovative development of Belarusian economy and accelerated growth of SGVA, the installed electric capacities are necessary to increase by 20–25 %. It is pointed that nuclear energy is the main resource of the fifth technological setup. The solving tasks during atomic

stations operation promote development of new technology, emergence and insure advanced production methods in various economy sections. It is offered to create microclimate, required by modern technologies, in working zones of plants and at workplaces in institutions by an automated system ASLOTU – the radiant system of insuring technological conditions, which had been created by Belarusian specialists. The structure of this infrared system, principles of its calculation and specific functioning algorithm are given. The ASLOTU technical and economic indicators have been determined – cost, service life, labor intensity and frequency of maintenance, costs of fuel consumed, period of covering capital outlays. The marked indicators are the result of processing the operation data of ASLOTU, which were implemented in Belarus for the period 1997 to 2007. They formed the basis of the draft ASLOTU introduction plan until 2035. The main planned indicators are given. The results can be used in other countries in which SGVA is 4.0–15.0 thousand dollars per person and they took course toward innovative development of the economy.

Key words: electricity, technological setup, gross value added, generating capacity, correlation analysis, indoor climate, infrared system, payback period, introduction plan

For citation: Akhramovich A. P., Voitov I. V., Kolos V. P. Integration of nuclear power station in the economy of Republic of Belarus. Infrared system ASLOTU. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 317–331 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-3-317-331>

Введение. Роль электричества. Электрическая энергия – энергия направленного движения заряженных частиц (в подавляющем большинстве случаев электронов) – обладает уникальными свойствами. Она чрезвычайно быстро и с относительно низкими затратами передается на большие расстояния, легко делится на части в любых пропорциях, просто и с малыми потерями преобразуется в другие виды энергии, гигиенична, экологична, не сложна в управлении (регулировании), элементарно контролируется и учитывается. Никакая другая совокупность способов и устройств не в состоянии обеспечить той экономичности, безопасности и надежности производственных процессов и комфортности бытовых условий, которые дают электротехнологии.

Со второй половины XIX в. электричество как прогрессивный вид энергии прочно укореняется на производстве и в быденной жизни. Уже в третьем технологическом укладе (1880–1930 гг.) электроэнергия играет роль основного ресурса [1–3]. Ее использование привело к развитию тяжелого машиностроения, образованию электротехнической промышленности, автомобильной отрасли, изобретению и внедрению телеграфа, телефона, радио. Странами – лидерами третьего уклада стали США, Великобритания, Франция, Германия [4, 5].

Доминирование электроэнергии просматривается и в последующих четвертом и пятом технологических укладах. Благодаря ей конвейерные технологии, автоматические линии со станками с программным управлением становятся основой для массового производства автомобилей, тракторов, самолетов, различных видов вооружения, товаров народного потребления и т. д. С 1970 г. в производственном секторе высокоразвитых стран активно набирают вес технологии на базе телекоммуникаций, роботостроения, микроэлектроники, вычислительной, оптико-волоконной и беспроводной техники. Зарождаются малозатратные аддитивные технологии и цифровая экономика [6–9].

Заложенное еще в 1920-е годы планом ГОЭРЛО приоритетное развитие электроэнергетики и рост в последующие десятилетия в Советском Союзе генерирующих мощностей позволили ему наравне с США и западноевропейскими странами стать лидером четвертого технологического уклада [5]. Однако увлечение современной России сырьевой экономикой (эпоха нефти закончилась в 1970-е годы) не позволило ей сохранить передовые позиции в пятом укладе [5, 10].

В настоящее время прорисовываются контуры уже шестого технологического уклада. Бесспорно, его станут определять экологически чистые производства, нано- и клеточные технологии, геновая инженерия, глобальные информационные сети. В рамках этого уклада с большой долей вероятности будут созданы квантовый компьютер и искусственный интеллект, на принципиально новый уровень поднимется управление экономикой. Замены же электричества на другой, более приемлемый вид энергии как в шестом, так и в последующих за ним укладах специалистами не предвидится.

В промышленном секторе высокоразвитых стран доля четвертого технологического уклада составляет примерно 20 %, пятого – 60 %, шестого – 5 % [11]. В то же время в постсоветских странах при потреблении электроэнергии на душу населения в 2,7 раза меньше, чем в развитых государствах [12], наблюдается следующее распределение: третий уклад – 30 %, четвертый – 50 %, пятый – 10 % [11]. В европейских близлежащих к нам странах с уже хорошо сформировавшейся цифровой экономикой потребление электроэнергии на душу населения намного превышает белорусское: в Швеции в 3,8 раза, Финляндии – в 4,3, Норвегии – в 6,5 раза [12].

О величине генерируемых мощностей. Из приведенных данных следует, что низкий уровень потребления электроэнергии в Беларуси не столько результат запаздывания в развитии технологий, сколько источник этого отставания. Проведем корреляционный анализ и определим численные значения характеристик отмеченной причинно-следственной связи. В качестве показателя уровня экономического развития государства примем удельную валовую добавленную стоимость (УВДС) – валовую добавленную стоимость за год, приходящуюся на душу населения страны. Составим массив из трех величин: УВДС, численность населения и УПЭ (удельное потребление электроэнергии, то есть потребление за год из расчета на одну душу населения страны) по статистическим данным за 2017 год 50 государств – 34 европейских с числом населения, превышающим 1 млн человек, и 16 с других континентов с УВДС бóльшим или сравнимым с УВДС Беларуси [12, 13]. Страны с их показателями в массиве расположим в соответствии с рейтингом, определяемым значением УВДС, затем в порядке сложившейся нумерации разобьем на пять групп – **A, B, C, D, E**, по 10 стран в каждой. Построенный таким образом массив из трех статистических рядов $X(x_i), Y(y_i), Z(z_i)$ приведен в табл. 1.

Для каждой группы стран по формулам

$$\bar{a}_i = \frac{1}{N} \sum_i a_i; \quad \langle a_i \rangle = \frac{\sum_i a_i z_i}{\sum_i z_i}; \quad a_i = x_i, y_i, N = 10 \quad (1)$$

были определены среднее арифметическое и среднее относительно числа населения значения следующих выборок $X, Y: i = 1; 10; i = 11; 20; \dots; i = 41; 50$; результаты расчета приведены в двух крайних правых столбцах табл. 1.

Используя данные по всем 50 странам, методом Пирсона найдем коэффициенты корреляции между полными статистическими рядами X, Z и $Y, Z (i = 1; 50)$. Их значения $r_{xz} = -0,07; r_{yz} = -0,036$ близки к нулю и по абсолютной величине не превосходят средних ошибок $m_{xz} \approx m_{yz} \approx 0,14$. Для решения вопроса о достоверности характера корреляционной связи было сформировано два множества пар рядов по 20, 30 и 40 произвольно выбранных согласованных по i элементов соответственно для первого множества из XZ , для второго – из YZ . Расчеты показывают, что корреляционные коэффициенты для рядов из первого и второго множества практически в равной мере имеют как положительные, так и отрицательные значения и находятся в интервале $(-0,22; +0,22)$. Из этого следует, что силы корреляционной связи между X и Z , а также между Y и Z малы, и цифры в двух последних столбцах табл. 1 характеризуют вероятностную зависимость удельной валовой добавленной стоимости от удельного потребления электроэнергии.

Отношение \bar{x}_i / \bar{y}_i является квалификационным показателем эффективности экономики групп государств, научно-технического и технологического уровня их развития. Для государств групп **A** и **B**, примерно 55 % добавленной стоимости которых обеспечиваются технологиями пятого уклада и 4 % шестого, при среднем по странам УПЭ соответственно 10,8 и 8,4 МВт·ч/чел. отношения \bar{x}_i / \bar{y}_i равны 5,0 и 4,4 тыс. долл./МВт·ч за год. Для групп **C** и **D** (доля шестого технологического уклада 2 % и пятого 30 %, УПЭ составляет 6,7 и 4,1 МВт·ч/чел.) показатели эффективности имеют значения 2,9 и 2,7 тыс. долл./МВт·ч. Для стран группы **E**, в которую входит Беларусь (пятый уклад не превышает 10 %, четвертый – 45 %, УПЭ – 3,6 МВт·ч/чел.), этот показатель приблизительно равен 1,4 тыс. долл./МВт·ч.

Определим необходимые условия перехода из группы **E** в соседнее с ней объединение **CUD**. Для этого из X и Y составим статистические ряды для **E** ($i = 41; 50$) и **CUD** ($i = 21; 40$) и определим значения основных корреляционных показателей (табл. 2). Значения величин, обозначенных литерой с волной, рассчитаны путем замены в соотношениях Пирсона $\bar{x}_i; \bar{y}_i$ на $\langle x_i \rangle; \langle y_i \rangle$.

Приведенные в табл. 2 данные свидетельствуют о наличии сильной положительной достоверной связи между УВДС и УПЭ. Таким образом, получаем, что для достижения экономикой Беларуси УВДС, характерной странам групп **CUD**, необходимо поэтапно нарастить электропотребление примерно на 40 %; вначале на 12–14 %, введя дополнительно к уже существующим 10 000 МВт установленных мощностей еще 2000–3000 МВт. Это позволит модернизировать производственный сектор экономики, увеличив в нем долю технологий пятого уклада в 2 раза, войти и закрепиться в группе **D**, достигнув УВДС 9–11 тыс. долл./чел.

Т а б л и ц а 1

T a b l e 1

Группа	№ п/п	Страна	УВДС тыс. долл./чел., X	УПЭ, МВт·ч/чел., Y	Численность населения, млн чел., Z	$\bar{x}_i; < x_i >$, тыс. долл./чел.	$\bar{y}_i; < y_i >$, МВт·ч/чел.
A	1	Швейцария	77,39	7,54	8,5	53,93; 57,07	10,83; 12,16
	2	Норвегия	66,60	23,58	5,3		
	3	Ирландия	65,25	5,83	4,8		
	4	США	59,88	12,57	326,0		
	5	Австралия	53,68	9,92	24,6		
	6	Швеция	47,45	13,53	10,1		
	7	Нидерланды	43,71	6,75	17,1		
	8	Австрия	42,41	8,47	8,8		
	9	Канада	42,18	14,29	36,5		
	10	Дания	40,72	5,84	5,8		
B	11	ОАЭ	40,18	13,05	9,4	37,34; 36,44	8,43; 7,06
	12	Финляндия	40,09	15,49	5,5		
	13	Германия	39,92	6,94	82,7		
	14	Бельгия	39,81	7,87	11,3		
	15	Новая Зеландия	39,13	8,60	4,8		
	16	Япония	38,15	8,11	126,7		
	17	Израиль	36,64	6,85	8,7		
	18	Великобритания	36,02	4,95	66,0		
	19	Франция	34,41	7,20	67,1		
	20	Италия	29,09	5,20	60,5		
C	21	Южная Корея	28,90	10,66	51,4	19,07; 23,61	6,70; 7,86
	22	Испания	25,59	5,54	46,5		
	23	Саудовская Аравия	20,92	9,59	32,9		
	24	Словения	20,10	7,10	2,1		
	25	Португалия	18,60	5,01	10,3		
	26	Эстония	17,92	7,23	1,3		
	27	Чехия	17,33	6,57	10,6		
	28	Греция	16,48	5,59	10,8		
	29	Словакия	15,85	5,46	5,4		
	30	Литва	15,32	4,29	51,4		
D	31	Латвия	13,89	3,68	1,9	11,28; 9,13	4,09; 4,60
	32	Чили	13,72	4,06	18,5		
	33	Аргентина	12,23	3,00	44,3		
	34	Венгрия	12,22	4,32	9,8		
	35	Польша	11,77	4,24	38,4		
	36	Хорватия	11,15	4,20	4,1		
	37	Россия	9,86	6,77	144,5		
	38	Румыния	9,78	2,78	19,6		
	39	Турция	9,41	3,26	80,3		
	40	Китай	8,76	4,55	1 386,4		
E	41	Казахстан	8,72	5,13	18,0	4,91; 4,80	3,62; 3,80
	42	Болгария	7,17	5,17	7,1		
	43	Южная Африка	5,52	4,01	56,7		
	44	Сербия	5,23	4,73	7,0		
	45	Беларусь	5,00	3,60	9,5		
	46	Македония	4,71	3,14	2,1		
	47	Босния и Герцеговина	4,40	3,80	3,5		
	48	Албания	3,93	2,14	2,9		
	49	Молдова	2,33	1,53	3,6		
	50	Украина	2,11	2,99	44,8		

Группа	$\bar{x}_i; <x_i>$, тыс. долл./чел.	$\bar{y}_i; <y_i>$, МВт·ч/чел.	$r_{xy}; \tilde{r}_{xy}$	$m_{xy}; \tilde{m}_{xy}$	$r_{xy} / m_{xy}; \tilde{r}_{xy} / \tilde{m}_{xy}$
Е	4,91; 4,80	3,62; 3,80	0,845; 0,826	0,095; 0,106	8,89; 7,78
СUD	15,49; 10,44	5,40; 4,89	0,746; 0,686	0,102; 0,12	7,32; 5,72
Группа	$\frac{\bar{x}_i - <x_i>}{\bar{x}_i}$	$\frac{\bar{y}_i - <y_i>}{\bar{y}_i}$	$\frac{r_{xy} - \tilde{r}_{xy}}{r_{xy}}$	$\frac{m_{xy} - \tilde{m}_{xy}}{m_{xy}}$	$\frac{r_{xy} / m_{xy} - \tilde{r}_{xy} / \tilde{m}_{xy}}{r_{xy} / m_{xy}}$
Е	0,023	-0,047	0,02	-0,116	0,125
СUD	0,326	0,093	0,08	-0,176	0,219

Ядерная энергетика является основным ресурсом пятого технологического уклада [1, 3]. Эксплуатация Белорусской АЭС (БелАЭС) даст не только необходимую для развития страны электрическую энергию высокого качества, но и приведет к позитивным изменениям во всех сферах деятельности, прежде всего в науке, технике и образовании. Перед обществом будут поставлены новые сложные задачи, решение которых поднимет интеллектуальный уровень населения, что положительно отразится на экономике и безопасности (обороноспособности) страны.

Энергоблок с реактором ВВЭР-1200 поколения 3+ БелАЭС является эволюционным продуктом. Данный реактор разработан на базе ВВЭР-1000; в нем улучшен практически каждый параметр. Это позволило повысить на 20 % мощность станции и увеличить срок службы энергоблока до 60 лет. Разработаны и внедрены также оригинальные дополнительные системы безопасности, позволяющие снизить вероятность выхода из контеймента радиоактивных продуктов деления при авариях. И главное, ВВЭР-1200 допускает модернизацию.

Российские специалисты при финансовой поддержке французско-немецкой фирмы Framatome для данного типа реактора разработали тепловыделяющую сборку с микротвэлами [14, 15]. Внедрение ее на действующих АЭС предполагается осуществлять простой заменой стержневыхборок, при этом корпус реактора и другие основные системы и агрегаты станции в реконструкции не нуждаются. Есть основания предположить, что в обозримом будущем данная модернизация будет проведена и на БелАЭС. В результате существенно снизится стоимость топливного цикла, а безопасность эксплуатации станции повысится до уровня, исключающего выход радиоактивных продуктов деления в атмосферу при любых авариях (даже при разрушении корпуса реактора и защитной железобетонной оболочки), при любых отказах оборудования, ошибочных действиях обслуживающего персонала и террористических актах. Микротвэлы – антитеррористическое ядерное топливо [16, 17].

АСЛОТУ. Общие положения. Согласно рейтингу эффективности использования топливно-энергетических ресурсов, Беларусь находится далеко от стран-лидеров. Энергоемкость ее ВВП – отношение потребленных за год тонн условного топлива к стоимости по международному обменному курсу произведенного валового внутреннего продукта – в 1,5 раза больше осредненного по европейским странам значения [12]. Данный факт говорит о насущной необходимости модернизации производственного сектора и сферы услуг с масштабным привлечением малозатратных технологий пятого и шестого укладов.

Прямое увеличение потребления электроэнергии в стране в результате пуска БелАЭС без повышения эффективности ее использования экономически нецелесообразно. В таком случае рациональное расходование электричества, вырабатываемого АЭС в Республике Беларусь, является проблемой не столько энергетики, сколько остальных отраслей экономики. Решать ее следует уже сейчас, рассматривая создавшуюся ситуацию с ожидаемым профицитом электроэнергии как уникальную возможность технологического прорыва в производственной, социальной и бытовой сферах. Но никакое, даже ультрасовременное оборудование пятого-шестого укладов не обеспечит должной конкурентоспособности продукции, если в рабочих зонах не будет создан надлежащий микроклимат.

В соответствии с материалами, положенными в основу международного стандарта ISO 7730, отклонение температуры в рабочей зоне (рис. 1) от оптимальной всего лишь на 1 °С приводит к снижению производительности труда на 3,6 %, а если отклонение составит 2–3 °С, то об успешном продвижении товаров на рынке и росте УВДС следует забыть. Аналогичная картина имеет место и для воздухообмена.

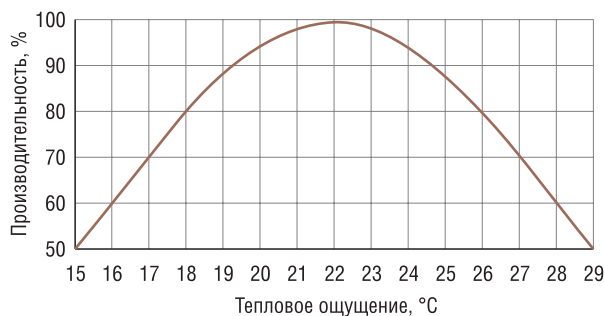


Рис. 1. Зависимость производительности труда от теплового ощущения

Fig. 1. Dependence of labor productivity on heat sensation

Обеспечение требуемых параметров микроклимата при минимально возможных затратах топливно-энергетических ресурсов возможно только с помощью отопительно-вентиляционных систем, снабженных интеллектуальными устройствами регулирования. Из них двухфункциональными, гибкими в управлении и потому наиболее эффективными оказались системы с электрическими инфракрасными (ИК) излучателями, разработанные специалистами НАН Беларуси при поддержке Департамента по энергоэффективности и Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь по заданию № 20 Государственной научно-технической программы «Энергосбережение». Эти устройства, состоящие из трех частей – батарей ИК-излучателей, сети электроснабжения с вводно-распределительным устройством и коммутационно-защитной аппаратурой, блоков управления с датчиками обратной связи, получили название АСЛОТУ (автоматизированная система лучистого обеспечения технологических условий).

Принцип работы АСЛОТУ состоит в преобразовании электрической энергии в энергию поперечных электромагнитных волн ИК-диапазона, одна часть которой при взаимодействии с предметами затрачивается на интенсификацию массообменных, химических, биохимических процессов, другая преобразуется в тепло, расходуемое на обогрев помещений. Этим объясняется двухфункциональность системы. АСЛОТУ не может существовать отдельно от строительного объекта, для которого она разработана, и поэтому классифицируется как изделие единичного производства, изготавливаемое по месту эксплуатации.

Методика расчета АСЛОТУ сводится к поиску параметров излучателей, характеристик установки их в помещении и элементов матрицы распределения электрической мощности, обеспечивающих требуемый строительными, санитарными и производственными нормами микроклимат в рабочей зоне при минимуме затрат:

$$J^0 = J + (\Psi_W + \Psi_S + \Psi_D)\tau^* = \min, \quad (2)$$

где J^0 – затраты на эксплуатацию АСЛОТУ за год; J – расход денежных средств на оплату энергии, потребленной АСЛОТУ и вентиляцией за год; Ψ_W , Ψ_S , Ψ_D – соответственно, затраты, обусловленные износом оборудования, расходы на оплату труда обслуживающего персонала и потери поступлений по банковскому депозиту за три года (примерный срок окупаемости АСЛОТУ) с момента ввода системы в эксплуатацию, отнесенные к продолжительности этого периода; τ^* – продолжительность работы АСЛОТУ в течение года [18].

В основу указанной методики положены результаты исследований теплопереноса в крупноячеистых гетерогенных системах, распространения электромагнитных волн в поглощающих средах, вихреобразования на шероховатых поверхностях, биологического воздействия инфракрасного излучения [19–22].

Эти данные позволили модернизировать и конструкцию ИК-излучателя, главным элементом которого является пакет излучающих (эманационных) пластин [23]. Сама пластина делается двуслойной; подложка изготавливается из алюминия, на нее наносится шероховатость в виде строго ориентированных треугольных канавок и затем покрывается слоем оксида. За счет различия в излучательных свойствах металлов и диэлектриков [24, 25] и особенностей вихревых пристеночных течений [21], приводящих к зарождению вихревой пелены вблизи поверхностей пластин, удалось значительно улучшить показатели излучателя. Ввод дополнительно к обычным (устоявшимся на практике) аргументам индикатрисы, влияющим на ее характер, двух новых – величины двугранного угла раскрытия канавок и толщины оксидного покрытия, позволили получить пространственное распределение в помещении энергии излучения АСЛОТУ, наиболее приемлемое для полифункционального действия. Вихревая же пелена является своеобразным теплоизолятором.

При умеренных температурах пластин (200–400 °С) она снижает интенсивность конвективного теплосъема с них, не усиливая при этом поглощение и рассеивание ИК-излучения.

В АСЛОТУ используется цифровое управление параметрами микроклимата. Алгоритм управления построен на основании нечеткой логики, содержит операции с псевдослучайными числами и кусочно-непрерывными функциями. Заложенные совокупность и последовательность действий позволяют минимизировать время перехода с одних значений параметров микроклимата на другие (например, при смене дежурного режима основным) и, соответственно, расход электрической энергии, потребляемой АСЛОТУ за этот период, а также исключить генерацию помех и загрязнение ими электрических сетей, удерживать спектр ИК-излучения близким к номинальному при работе АСЛОТУ на частичных нагрузках.

Технико-экономические показатели АСЛОТУ. В период с 1997 по 2007 г. АСЛОТУ была внедрена более чем на 30 объектах народного хозяйства – ею оснащены свыше 1000 помещений различного целевого назначения. Помимо этого, были выполнены десятки проектов АСЛОТУ, которые прошли экспертизу в РУП «Главгосстройэкспертиза», разработаны детальные технико-экономические обоснования для ведущих предприятий промышленности и сельского хозяйства, учреждений, здравоохранения и образования. Обобщение данных, полученных в результате этих работ, позволили определить стоимость и срок окупаемости АСЛОТУ, экономию топливно-энергетических ресурсов в результате перехода от традиционных систем отопления к лучистым для различных отраслей экономики.

Удельная стоимость АСЛОТУ (в расчете на 1 м²) цехов промышленных предприятий нелинейно зависит от F – суммарной площади рабочих зон, в которых она обеспечивает требуемый микроклимат; значения ее приведены на графике (рис. 2). Для учреждений здравоохранения стоимость данной системы составляет 90–100 долл./м², для учреждений образования и социального обслуживания – 65–75 долл./м², объектов транспорта и коммуникаций – 58–62 долл./м², цехов и ферм сельскохозяйственных предприятий 65–70 долл./м².

Анализ процесса образования стоимости АСЛОТУ позволяет сделать вывод, что при массовом производстве данных систем их цена снизится в 1,5–2 раза.

На практике переход от традиционных (воздушных или водяных) систем отопления к АСЛОТУ приводил к заметному снижению расхода топливно-энергетических ресурсов в результате разбиения помещений на участки и поддержания индивидуальных параметров микроклимата на них, концентрации лучистого потока на технологическом оборудовании, более полной автоматизации обогрева, сокращения теплотрасс с их большими потерями тепла, уменьшения кратности воздухообмена. Это обусловлено снижением градиента температуры воздуха по высоте помещения, уменьшением инфильтрации через ограждающие конструкции, сравнительно небольшой тепловой инерционностью ИК-излучателей, гистерезисом в процессе прогрева и остывания здания при переходе с дежурного режима на основной и обратно. При работе АСЛОТУ на предприятиях и учреждениях различных сфер деятельности перечисленные факторы проявляются по-разному, поэтому и средняя величина снижения затрат топливно-энергетических ресурсов неодинакова – по учреждениям здравоохранения и образования она составляет 1,5 раза, по промышленным и сельскохозяйственным предприятиям – соответственно 1,8 и 1,6 раза, по объектам транспортной инфраструктуры – 1,7 раза.

В Беларуси большинство предприятий построено в послевоенные годы. Они спроектированы из расчета минимальных затрат на последующую их внутреннюю перепланировку и обновление инженерно-технических

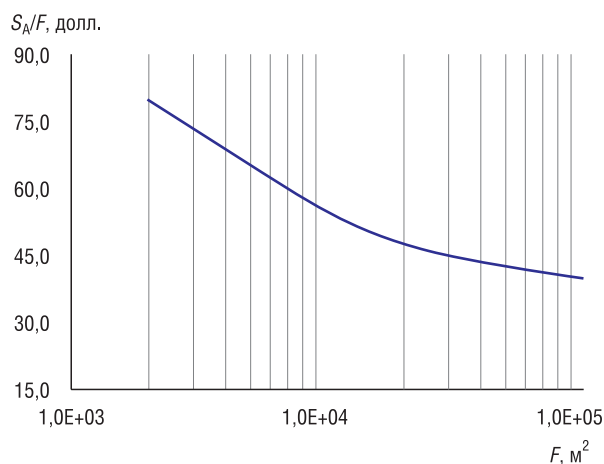


Рис. 2. Зависимость удельной стоимости АСЛОТУ от суммарной площади рабочих зон, оснащаемых ею

Fig. 2. Dependence of the unit cost of ASLOTU on the total area of the working areas equipped with it

коммуникаций. Корпуса этих предприятий представляют собой многоэтажные или одноэтажные здания широкой застройки; в них легко решается вопрос выделения помещений посредством сборно-разборных перегородок. Многоэтажность дает возможность организовать технологические процессы как по горизонтали, так и по вертикали. Такие корпуса экономически намного выгоднее одноэтажных с традиционным отоплением – при одинаковых производственных мощностях площадь, отведенная под технологический процесс, у них меньше на 20 %, протяженность внутрикорпусных коммуникаций – на 50 %, почти в 3 раза ниже расход энергии на отопление [26].

Сравнительно небольшой градиент температуры по высоте цеха, имеющий место при функционировании АСЛОТУ (менее 0,2 К/м против 1,5 К/м при традиционном отоплении), позволяет организовывать технологические процессы по вертикали и в одноэтажных корпусах, получая показатели не хуже, чем в многоэтажных. Подтверждением этому являются результаты совместного внедрения АСЛОТУ и вертикальных технологических линий по производству ободьев на Бобруйском заводе тракторных деталей и агрегатов и по нанесению эмали на проволоку в СОО «Гомелькабель».

Строительство заводских корпусов в Беларуси осуществлялось из стандартных сборных железобетонных конструкций по типовым проектам. Такие здания при использовании АСЛОТУ еще длительное время морально не устареют, обеспечивая в полном объеме требования, предъявляемые к технологиям пятого и шестого укладов.

Срок окупаемости АСЛОТУ. Внедрение АСЛОТУ в Беларуси относится к энергосберегающим мероприятиям. Срок окупаемости t , то есть отрезок времени, за который прибыль от реализации таких мероприятий становится равной сумме вложенных денег и понесенных затрат, определяется без учета изменения ценности затраченных средств, как отношение капитальных вложений K к экономическому эффекту за год E . В соответствии с этим исходные формулы для расчета сроков окупаемости АСЛОТУ и традиционной отопительной системы принимают следующий вид:

$$t_A = \frac{K_A}{E_A}; t_T = \frac{K_T}{E_T}. \quad (3)$$

Здесь и далее литерой «А» отмечены величины, относящиеся к АСЛОТУ; «Т» – к традиционной системе отопления.

Введем обозначение

$$E_A - E_T = \Delta \tilde{E}, \quad (4)$$

после чего преобразуем исходную формулу (3) для расчета срока окупаемости АСЛОТУ следующим образом:

$$t_A = \frac{K_A}{\frac{K_T}{t_T} + \Delta \tilde{E}}. \quad (5)$$

Разность годовых экономических эффектов от функционирования АСЛОТУ и традиционной системы $\Delta \tilde{E}$ представим в виде четырех составляющих:

$$\Delta \tilde{E} = C(B_T - B_A) + \left(\frac{K_T}{\tau_T} - \frac{K_A}{\tau_A} \right) + (N_T - N_A) + \Delta E, \quad (6)$$

учитывающих различия (в порядке записи в формуле): в затратах на потребляемое топливо, потерях на физический и моральный износ систем, в расходах на обслуживание и эксплуатацию, а также экономический эффект от положительного воздействия ИК-излучения на технологический процесс ΔE , тыс. руб./т. Здесь τ – нормативный срок службы системы, год; B – расход условного топлива за год, т/год; C – расчетная стоимость 1 т у.т., тыс. руб./т; N – издержки за год на обслуживание и эксплуатацию, тыс. руб./год.

Эффект от воздействия ИК-излучения обусловлен многими факторами, как правило:

в промышленности – улучшением качества продукции, увеличением ассортимента, повышением производительности труда;

в животноводстве – снижением падежа, увеличением привесов при прежнем (нормируемом) потреблении кормов, интенсификацией молокоотдачи;

в медицине – реальным уменьшением периода и стоимости как лечения, так и реабилитации, увеличением процента полного выздоровления пациентов;

в сфере образования – улучшением усваиваемости материала в учебных заведениях, снижением заболеваемости детей в дошкольных учреждениях.

Подставив (6) в (5), получим выражение для оценки срока окупаемости АСЛОТУ в зависимости от технико-экономических показателей традиционной отопительной системы, одной из косвенных характеристик которой является срок окупаемости t_T , и эффективности соответствующего ей (не модернизированного) технологического процесса.

Многолетний опыт использования АСЛОТУ в основных отраслях экономики Беларуси показывает, что эксплуатационные затраты (без топливной составляющей) рассматриваемого типа ИК-системы примерно равны соответствующим расходам на функционирование традиционного отопления.

Трудоемкость обслуживания АСЛОТУ (табл. 3) разработана на основании ресурсно-сметных норм, прейскуранта цен на низковольтные устройства и ценника на пуско-наладочные работы и утверждена Национальной академией наук Беларуси.

Частота обслуживания оборудования АСЛОТУ установлена не менее одного раза в год. Квалификация персонала: инженер или техник с опытом обслуживания электронных цифровых систем автоматического управления не менее трех лет; электромонтер не ниже 4-го разряда с опытом обслуживания низковольтного электротехнического оборудования и устройств промышленной автоматики не менее одного года. Затраты времени на работы по обслуживанию АСЛОТУ у инженера (техника) и электромонтера распределяются в соотношении 2 : 1.

При таком регламенте потери на обслуживание инфракрасной и традиционной систем оказываются близкими между собой, и для обоснования инвестиций можно положить $N_A = N_T$.

В случае разработки технико-экономического обоснования целесообразности внедрения АСЛОТУ на новостроящихся объектах принимается:

$$N_A = N_T; K_A = S_A; K_T = S_T, \quad (7)$$

где S_0 – начальная стоимость системы.

В расчетах, аргументирующих замену действующих традиционных отопительных систем на АСЛОТУ, понесенные затраты в результате вывода их из эксплуатации учитываются путем увеличения капитальных вложений:

$$K_A = S_A + W_T + S_T \left(1 - \frac{\tau_T^*}{\tau_T} \right) U \left(1 - \frac{\tau_T^*}{\tau_T} \right). \quad (8)$$

Здесь $U(\cdot)$ – единичная симметричная функция; W_T – затраты на демонтаж или консервацию; τ_T^* – период эксплуатации традиционной системы от ее пуска до демонтажа или консервации.

С конца 1980-х годов все заметнее стала проявляться тенденция снижения срока службы отопительного оборудования, связанная, в основном, с его ускоренным моральным старением. В ближайшее время в Беларуси эта закономерность будет только прогрессировать, что обусловлено переходом на технологии пятого-шестого укладов и постоянно растущими темпами совершенствования производственных операций. Поэтому в методику расчета ИК-системы, одобренной Госстандартом Республики Беларусь (заключение от 13.04.2001 № 02-/2313), были заложены значения t_T , τ_T , равные принятым в Советском Союзе, соответственно 10 и 8 лет, которые не занижают срока окупаемости АСЛОТУ.

Цифровое управление работой АСЛОТУ позволяет путем элементарного ввода в машинный код обновленных данных по микроклимату перестроить ее функционирование в соответствии с требованиями внедряемой технологии. Как менее подверженных моральному старению и не имеющих движущихся частей, срок службы излучателей и сети электроснабжения, следует определять по физическому износу – 30–32 года согласно [27], а блока управления – 8–10 лет, так же как и серийных контроллеров. В итоге получаем, что значение τ_A , рассчитанное с учетом стоимостного веса срока службы каждой составляющей части АСЛОТУ:

№ п/п	Наименование оборудования	Трудоемкость, чел.-час
1	Инфракрасный излучатель одноступенчатый, установленный на высоте до 3 м	0,60
	3–5 м	0,63
	5–8 м	0,65
	свыше 8 м	0,70
2	Инфракрасный излучатель двухступенчатый, установленный на высоте до 3 м	1,0
	3–5 м	1,10
	5–8 м	1,15
	свыше 8 м	1,20
3	Инфракрасный излучатель трехступенчатый, установленный на высоте до 3 м	1,60
	3–5 м	1,70
	5–8 м	1,80
	свыше 8 м	1,85
4	Датчик обратной связи	0,25
5*	Модуль управления параметрами излучения одноканальный	2,0
	двухканальный	2,8
6*	Преобразователь мощности одноканальный	0,7
	двухканальный	1,0
	четырёхканальный	1,7
7*	Шкаф управления параметрами излучения однозонный	2,8
	двухзонный	4,0
	трехзонный	5,0
8*	Шкаф (модуль) плавного регулирования мощности однозонный	0,7
	двухзонный	1,0
	трехзонный	1,2
9	Вводно-распределительное устройство мощностью до 100 кВт	2,8
	100–350 кВт	3,0
	350–600 кВт	3,2
	свыше 600 кВт	3,5
10	Распределительное устройство (защитно-коммутационная аппаратура) с количеством распределительных выключателей до 5	0,45
	5–10	0,7
	свыше 10	1,0

*Оборудование в позициях 5–8 относится к блоку управления.

$$\tau_A = \sum_{i=1}^3 \frac{S_i}{S_A} \tau_i, \quad (9)$$

находится в пределах 25–28 лет. Здесь S_i , τ_i – соответственно начальная стоимость и срок службы i -й части АСЛОТУ.

Рассчитанные по формулам (5)–(9) с учетом значений параметров, оговоренных выше, сроки окупаемости АСЛОТУ для реальных объектов ведущих отраслей экономики Беларуси составляют 2,3–3,4 года. В действительности же они оказались еще меньшими – верхний предел не превышал трех лет.

Проект плана внедрения АСЛОТУ. Привлекательные значения срока окупаемости наряду с приемлемой стоимостью, длительным сроком службы и техническими параметрами, удовлетворяющими малозатратным технологиям пятого-шестого укладов, явились одним из

главных аргументов в пользу начала проработки условий масштабного применения АСЛОТУ в Республике Беларусь. К настоящему времени составлен проект плана внедрения данной ИК-системы. Он создан в соответствии с Концепцией Национальной стратегии устойчивого развития Республики Беларусь на период до 2035 г. (ЧЕЛОВЕК+ЭКОНОМИКА+ЭКОЛОГИЯ) и отвечает целям в области устойчивого развития, сформулированным Организацией Объединенных Наций: №3 хорошее здоровье и благополучие, №4 качественное образование, №8 достойная работа и экономический рост, №9 индустриализация, инновация и инфраструктура [28]. План внедрения АСЛОТУ сориентирован на содействие ускоренному развитию высокотехнологичных секторов национальной экономики, связанных с приоритетными направлениями инновационной деятельности: промышленное производство, обороноспособность, биотехнологии в сельском хозяйстве, обучение, медицина, транспортная инфраструктура. Исходя из этих позиций, определены масштаб и области использования АСЛОТУ. Значения основных показателей данного плана представлены в табл. 4–8.

Производственные и приравненные к ним объекты. АСЛОТУ устанавливается в цехах машиностроительных, станкостроительных, приборостроительных предприятий, на производственных участках заводов точной механики, радиотехнической и электронной продукции, электротехнической, оптико-механической отрасли, в хранилищах и пунктах ремонта и технического обслуживания военной техники.

Т а б л и ц а 4

T a b l e 4

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	2400,0	1080,0	1320,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	480,0	216,0	264,0
Средняя потребляемая мощность, МВт	за отопительный сезон	99,0	121,0
	вне отопительного сезона	0,0	0,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч	за отопительный сезон;	495,0	605,0
	вне отопительного сезона;	0,0	0,0
	всего	1100,0	605,0
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	115,0	51,8	63,2

Сельскохозяйственные объекты. АСЛОТУ монтируется в телятниках, в доильных блоках молочных ферм, в цехах доразивания поросят-отъемышей и свинарниках-маточниках свинокомплексов, на птицефабриках в цехах с напольным содержанием бройлеров, в овощных теплицах, в оранжереях с низкорослыми растениями.

Т а б л и ц а 5

T a b l e 5

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	1405,0	632,0	773,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	340,0	153,0	187,0
Средняя потребляемая мощность, МВт	за отопительный сезон	73,0	89,0
	вне отопительного сезона	29,5	16,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч	за отопительный сезон	360,0	440,0
	вне отопительного сезона;	110,0	60,5
	всего	910,0	500,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	91,0	41,0	50,0

Учреждения образования и социального обеспечения. АСЛОТУ внедряется в школах, лицеях, детских садах, дворцах молодежи, в интернатах, детских домах, в учреждениях для обучения и воспитания детей и подростков с психическими и физическими отклонениями, в домах инвалидов и престарелых.

Т а б л и ц а 6
T a b l e 6

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	1110,0	499,5	610,5
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	230,0	103,5	126,5
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	115,0	51,0	64,0
	30,0	13,5	16,5
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	575,0	258,5	316,5
	100,0	45,0	55,0
	675,0	303,5	371,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	78,0	35,0	43,0

Учреждения здравоохранения. АСЛОТУ оснащаются операционные, лаборатории, родильные залы, манипуляционные, реанимационные, боксы и палаты для новорожденных, палаты детских отделений, а также отделения хирургии, урологии, гинекологии, лучистой диагностики, гематологии и ожоговые центры.

Т а б л и ц а 7
T a b l e 7

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	460,0	207,0	253,0
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	115,0	51,5	63,5
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	58,0	26,0	32,0
	23,0	10,0	13,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	290,0	130,5	159,5
	85,0	38,5	46,5
	375,0	169,0	206,0
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	41,0	18,5	22,6

Объекты транспортной инфраструктуры. АСЛОТУ размещается в залах ожидания железнодорожных и автобусных вокзалов и станций.

Т а б л и ц а 8
T a b l e 8

Параметр	Значение		
	Всего	2020–2027 гг.	2028–2035 гг.
Площадь помещений для оснащения системой АСЛОТУ, тыс. м ²	90,0	40,5	49,5
Суммарная установленная мощность АСЛОТУ, МВт	20,0	9,0	11,0
Средняя потребляемая мощность, МВт за отопительный сезон вне отопительного сезона	9,0	4,0	5,0
	0,0	0,0	0,0
Потребляемая энергия, тыс. кВт·ч за отопительный сезон вне отопительного сезона всего	45,0	20,5	24,5
	0,0	0	0
	45,0	20,5	24,5
Суммарная стоимость АСЛОТУ, млн долл. США	5,3	2,4	2,9

Заклучение. При существующем спектре потребностей в тепле и электричестве ввод в эксплуатацию БелАЭС приведет к вытеснению из базовой зоны графика нагрузки части электроэнергии ТЭЦ, вырабатываемой в экономичном теплофикационном режиме. Поэтому уже сейчас намечаются технические мероприятия, способствующие поддержанию оптимального соотношения между выработкой электроэнергии и тепла в зимний период времени.

Внедрение ИК-систем АСЛОТУ, потребляющих электроэнергию в основном в холодный период года, позволяет частично решить эту проблему. Полностью она может быть снята при плановом переводе на электроотопление части объектов ЖКХ, которые в настоящее время дают солидную добавку в потребление тепла зимой. При этом приоритет должны иметь решения, способствующие повышению комфортности в квартирах. Рыночная экономика подталкивает к этому, вынуждая предоставлять потребителю выбор между стоимостью и уровнем комфорта.

Данная политика в сфере отопления ЖКХ обоснована вескими объективными причинами. Нынешний экономический рост вызван бурным развитием информационных технологий. Последующий подъем экономики специалисты связывают с укреплением здоровья людей, созданием условий для восстановления и, главное, снятия умственной усталости от напряженного труда на производстве пятого-шестого технологических укладов. В данный момент и в перспективе лишь электрическое отопление способно обеспечить высокие гигиенические показатели микроклимата и комфортную обстановку в жилых помещениях. Для этого будут использоваться как конвекторы, так и ИК-системы, функционирующие по алгоритму АСЛОТУ.

Широкомасштабное внедрение АСЛОТУ в Беларуси уже в ближайшее время потребует специальных подготовительных мероприятий, прежде всего внесение изменений в нормативно-правовые акты, регламентирующие внедрение АСЛОТУ и приведение тарифов на электричество и тепло в соответствие с затратами условного топлива на их выработку. Вместе с этим следует проводить информационную и разъяснительную работу на предприятиях и в учреждениях – потенциальных потребителях этой системы, организовать переподготовку проектировщиков, энергоаудиторов, работников Главгосстройэкспертизы, энергетиков, инженеров – эксплуатационников АСЛОТУ, разработав для этого программы обучения, методические и наглядные пособия, тренажеры.

Министерства энергетики, экономики и образования Республики Беларусь, Национальная академия наук Беларуси, Государственный комитет по науке и технологиям, Государственный комитет по стандартизации Республики Беларусь обладают должным научно-техническим и кадровым потенциалом для практической реализации перечисленных мероприятий.

Список использованных источников

1. Вдовина, А. А. Понятие «технологического уклада» в системе экономических категорий и новые технологические уклады общественного развития / А. А. Вдовина // Креативная экономика. – 2019. – Т. 13, №4. – С. 605–618. <http://doi.org/10.18334/ce.13.4.40522>
2. Авербух, В. М. Шестой технологический уклад и перспективы России / В. М. Авербух // Вестн. Ставропол. гос. ун-та. – 2010. – № 7. – С. 159–166.
3. Шесть технологических укладов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://general-skokov.livejournal.com/24586.html> – Дата доступа: 10.01.2020.
4. Андреева, М. Е. Технологические уклады в современной экономике [Электронный ресурс] / М. Е. Андреева. – Екатеринбург: УрФу, 2016. – Режим доступа: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13457/1/Andreeva_0.pdf – Дата доступа: 10.01.2020.
5. Глазьев, С. Ю. Новый технологический уклад в современной мировой экономике / С. Ю. Глазьев // Междунар. экономика. – 2010. – № 5. – С. 5–27.
6. Чижик, С. А. Аддитивные технологии: современное состояние и перспективы / С. А. Чижик // Материалы 8-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение – 2015». – Минск: БНТУ, 2015. – Т. 1. – С. 3–4.
7. Аддитивные технологии – динамично развивающееся производство [Электронный ресурс] / О. Н. Гончарова [и др.] // Инженер. вестн. Дона. – 2016. – № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931> – Дата доступа: 21.01.2020.
8. Паньшин, Б. Цифровая экономика: особенности и тенденции развития / Б. Паньшин // Наука и инновации. – 2016. – № 3 (157). – С. 17–20.
9. Головенчик, Г. Г. Цифровая экономика как новый этап глобализации / Г. Г. Головенчик // Цифровая трансформация. – 2018. – № 1(2). – С. 26–36.
10. Семенов, Е. Ю. Технологические уклады в экономике и инновационный потенциал развития России / Е. Ю. Семенов, С. А. Козин // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. – 2010. – № 5 (45). – С. 327–331.

11. Зубрицкий, А. Ф. Научное обеспечение развития новейших технологических укладов в Республике Беларусь / А. Ф. Зубрицкий, Н. Ф. Зеньчук, И. А. Зубрицкая // *Новости науки и технологий*. – 2017. – №4 (43). – С. 35–41.
12. Key world energy statistics [Electronic resource]. – IEA Publications, 2019. – Mode of access: <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019> – Date of access: 14.01.2020.
13. Макроэкономика [Электронный ресурс] / Ин-т экономики и права Ивана Кушнера. – Режим доступа: <http://be5.biz/makroekonomika/index.html> – Дата доступа: 15.01.2020.
14. ВВЭР с микротвэлами: отчет о НИР [Электронный ресурс] / ВНИИАМ; рук. Л. Н. Фальковский. – М., 2003. – Режим доступа: <http://www.vniiam.narod.ru> – Дата доступа: 23.01.2020.
15. О возможности продления срока службы реактора ВВЭР-440 за счет использования ТВС с микротвэлами / Е. И. Гришанин [и др.] // Сб. тр. 11-й Междунар. науч.-техн. конф. «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: Росэнергоатом, 2018. – С. 78–81.
16. Пономарев-Степной, Н. Микротвэлами против ядерных катастроф и терроризма [Электронный ресурс] / Н. Пономарев-Степной, Е. Гришанин, Н. Кухаркин // *Промышленные ведомости*. – 2001. – № 18 (29). – https://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml – Дата доступа: 14.01.2020.
17. Гришанин, Е. И. Антитеррористическое топливо для АЭС / Е. И. Гришанин // *Атомная стратегия*. – 2007. – № 29. – С. 15.
18. Ахрамович, А. П. Методология расчета двухфункциональной инфракрасной системы АСЛОТУ / А. П. Ахрамович, Г. М. Дмитриев, В. П. Колос // *Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук*. – 2013. – № 1. – С. 71–76.
19. Дмитриев, Г. М. Базовая модель сопряженного расчета оптимальных параметров системы инфракрасного обогрева цехов приборостроительных предприятий: дис. ... канд. техн. наук : 01.04.14 / ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН Беларуси. – Минск, 2003. – 165 л.
20. Зуев, В. Е. Распространение видимых и инфракрасных волн в атмосфере / В. Е. Зуев. – М.: Совет. радио, 1970. – 496 с.
21. Гольдштик, М. А. Вихревые потоки / М. А. Гольдштик. – Новосибирск: Наука, 1981. – 366 с.
22. Мачкаши, А. Лучистое отопление / А. Мачкаши, Л. Банхиди. – М.: Стройиздат, 1985. – 484 с.
23. Ахрамович, А. П. Электрические ИК-излучатели средней удельной мощности. О целесообразности прямого электроотопления / А. П. Ахрамович, Г. М. Дмитриев, В. П. Колос // *Энергоэффективность*. – 2006. – № 12. – С. 14–17.
24. Брамсон, М. А. Инфракрасное излучение нагретых тел / М. А. Брамсон. – М.: Наука, 1964. – 223 с.
25. Излучательные свойства твердых материалов / под ред. А. Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 471 с.
26. Михайлов, Г. Н. Проблема комплексности в проектировании промышленных предприятий / Г. Н. Михайлов // *Промышленное строительство*. – 1980. – № 8. – С. 10–18.
27. Богуславский, Л. Д. Снижение расхода энергии при работе систем отопления и вентиляции / Л. Д. Богуславский. – М.: Стройиздат, 1985. – 336 с.
28. Беларусь на пути достижения целей устойчивого развития. – Минск: Нац. стат. ком. Респ. Беларусь, 2019. – 30 с.

Reference

1. Vdovina A. A. The concept of “technological structure” in the system of economic categories and new technological structures of social development. *Kreativnaya ekonomika = Creative Economy*, 2019, vol. 13, no. 4, pp. 605–618 (in Russian). <http://doi.org/10.18334/ce.13.4.40522>
2. Averbukh V. M. The sixth technological setup and Russian perspectives. *Vestnik Stavropol'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Proceedings of Stavropol State University], 2010, no. 7, pp. 159–166 (in Russian).
3. *The Sixth Technological Setup*. Available at: <https://general-skokov.livejournal.com/24586.html> (accessed 10 January 2020) (in Russian).
4. Andreeva M. E. *Technological Setup in the Modern Economy*. Ekaterinburg, 2016. Available at: https://study.urfu.ru/Aid/Publication/13457/1/Andreeva_0.pdf (accessed 10 January 2020) (in Russian).
5. Glaz'ev S. Yu. The new technological setup in the world economy. *Mezhdunarodnaya ekonomika = World Economics*, 2010, no. 5, pp. 5–27 (in Russian).
6. Chizhik S. A. Additive technologies: current status and prospects. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferentsii “Priborostroenie – 2015”* [Reports of 8th International Scientific Conference “Instrumentation Engineering – 2015”]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2015, vol. 1, pp. 3–4 (in Russian).
7. Goncharova O. N. Additive technologies – a dynamically developing production. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2016, no. 4. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2016/3931> (accessed 21 January 2020) (in Russian).
8. Pan'shin B. Digital economy: features and development trends. *Nauka i innovatsii = Science and Innovation*, 2016, no. 3 (157), pp. 17–20 (in Russian).
9. Goloventchik G. G. Digital economy as a new stage of globalization. *Tsifrovaya transformatsiya = Digital Transformation*, 2018, no. 1 (2), pp. 26–36 (in Russian).
10. Semenov E. Yu., Kozin S. A. Technological setup in economy and innovative potential of Russian development. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*, 2010, no. 5 (45), pp. 327–331 (in Russian).
11. Zubritsky A. F., Zubritskaya I. A. Scientific support of the development of advanced technological setup in the Republic of Belarus. *Novosti nauki i tekhnologii* [Science and Technology News], 2017, no. 4 (43), pp. 35–41 (in Russian).

12. *Key world energy statistics*. IEA Publications, 2019. Available at: <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2019> (accessed 14 January 2020) (in Russian).
13. Ivan Kushner' Institute of Economics and Law. *Macroeconomics*. Available at: <http://be5.biz/makroekonomika/index.html> (accessed 15 January 2020) (in Russian).
14. Fal'kovskii L.N. *WVER with micro fuel particles: Report on Research*. Moscow, 2003. Available at: vniiam.narod.ru/rus2/vvr.doc (accessed 21 January 2020) (in Russian).
15. Grishanin E. I., Alekseev P. N., Kelin G. E., Padun S. P., Fonarev B. I. Possibility of the life extending of the WVER-440 reactor by using the fuel assemblies with micro fuel particles. *Sbornik trudov 11-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoi energetiki"* [Proceedings of the 11th International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Energy"]. Moscow, Rosenergoatom Publ., 2018, pp. 78–81 (in Russian).
16. Ponomarev-Stepnoy N., Grishanin E., Kuharkin N. Microfuel particles against nuclear disasters and terrorism. *Promyshlennye vedomosti* [Industry News], 2001, no. 18 (29). Available at: https://www.promved.ru/oct_2001_04.shtml (accessed 14 January 2020) (in Russian).
17. Grishanin E. I. Antiterrorist fuel for nuclear power plants. *Atomnaya strategiya* [Nuclear Strategy], 2007, no. 29, p. 15 (in Russian).
18. Akhramovich A. P., Dmitriev G. M., Kolos V. P. Methodology for calculating of the two-function infrared system ASLOTU. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2013, no. 1, pp. 71–76 (in Russian).
19. Dmitriev G. M. *The Basic Model for the Adjoint Calculation of the Infrared Heating System Optimal Parameters for the Instrument-Making Enterprises Workshops*. Minsk, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, 2003. 165 p. (in Russian).
20. Zuev V. E. *Propagation of Visible and Infrared Waves in the Atmosphere*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1970. 496 p. (in Russian).
21. Gol'dstick M. A. *Vortex Flows*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1981. 366 p. (in Russian).
22. Machkashy A., Banhidly L. *Radiant Heating*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 484 p. (in Russian).
23. Akhramovich A. P., Dmitriev G. M., Kolos V. P. Electric infrared radiant of medium specific power. Feasibility of direct electric heating. *Energoeffektivnost' = Energy Efficiency*, 2006, no. 12, pp. 14–17 (in Russian).
24. Bramson M. A. *Infrared Radiation of Heated Bodies*. Moscow, Nauka Publ., 1964. 223 p. (in Russian).
25. Sheindlin A. E., ed. *Radiative Properties of Solid Materials*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 471 p. (in Russian).
26. Mihailov G. N. Problem of complexity in the design of industrial enterprises. *Promyshlennoe stroitel'stvo* [Industrial Engineering], 1980, no. 8, pp. 10–18 (in Russian).
27. Boguslavskii L. D. *Reduced Energy Consumption during Operation of Heating and Ventilation Systems*. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 336 p. (in Russian).
28. *Belarus on the Way of Achieving Sustainable Development Goals*. Minsk, National Statistical Committee of the Republic of Belarus, 2019. 30 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ахрамович Александр Павлович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ahral2012@mail.ru

Войтов Игорь Витальевич – доктор технических наук, ректор, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rektor@belstu.by

Колос Валерий Павлович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 65, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kolosvp@mail.ru

Information about the authors

Aliaksandr P. Akhramovich – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ahral2012@mail.ru

Igor V. Voitov – D. Sc. (Engineering), Rector, Belorussian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rektor@belstn.by

Valery P. Kolos – D. Sc. (Physics and Mathematics), Main Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kolosvp@mail.ru