

Математические и информационные технологии в энергетике

УДК 620.92

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.006

Атомная энергетика как одно из направлений устойчивого энергетического развития республики Беларусь

Зорина Татьяна Геннадьевна

Институт энергетики НАН Беларуси, Республика Беларусь, Минск, *tanyazorina@tut.by*

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы развития атомной энергетики в Республике Беларусь в контексте устойчивого энергетического развития. На основе авторской методики проведен анализ динамики устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995-2020 гг. Определены направления устойчивого энергетического развития Республики Беларусь до 2030 г. Построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, собрана база исходных данных для моделирования энергопроизводства электрической энергии на среднесрочный период в программе MESSAGE. Построены сценарии развития энергосистемы Республики Беларусь с учетом ввода в эксплуатацию Белорусской атомной станции, в зависимости от разных темпов роста спроса на электроэнергию. Выполнены прогнозы производства и стоимости электрической энергии в энергетической системе Республики Беларусь на период до 2050 г. согласно выбранным сценариям. Проведен сравнительный анализ результатов моделирования по следующим критериям: структура энергопроизводства, объемы и структура вводимых мощностей, расход топлива на производство электроэнергии, стоимость электроэнергии.

Ключевые слова: устойчивое энергетическое развитие, индекс устойчивого энергетического развития, структура энергопроизводства, атомная энергетика, MESSAGE, сценарное моделирование, энергетическая система Республики Беларусь, производственная себестоимость электрической энергии

Цитирование: Зорина Т.Г. Атомная энергетика как одно из направлений устойчивого энергетического развития республики Беларусь / Т.Г. Зорина // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 3(27). – С. 49-67. – DOI: 10.38028/ESI.2022.27.3.006.

Введение. Энергетическая система Республики Беларусь – стабильно работающий технологический комплекс, который обеспечивает надежное и бесперебойное снабжение потребителей страны энергией.

В энергетической системе в настоящее время продолжается работа по обновлению и повышению эффективности работы производственных фондов, а также повышению надежности энергоснабжения потребителей. Наряду с модернизацией основных производственных фондов и внедрением новых высокоэффективных генерирующих мощностей проводится системная работа по снижению затрат на производство, передачу и распределение энергии. Наиболее важным проектом для энергетического комплекса Республики Беларусь остается эксплуатация Белорусской атомной электростанции (БелАЭС), что имеет существенное значение для развития не только энергетической сферы, но и всей экономики страны [1, 2].

Это соответствует стратегической цели развития топливно-энергетического комплекса, предусматривающей удовлетворение потребностей экономики и населения страны в энергоносителях на основе их максимального эффективного использования при снижении нагрузки на окружающую среду [3-9].

Методология исследования. Устойчивое энергетическое развитие – процесс развития способной к саморегулированию системы с целью достижения региональной энергетической безопасности при рациональном использовании энергоресурсов, обеспечении социального равенства в области доступа к энергоуслугам и сохранении окружающей среды в условиях неопределенности. Устойчивое энергетическое развитие характеризует не только функционирование энергетического сектора какой-либо территориальной единицы, а в

целом определяет направления развития экономики данной территории и её социальной сферы.

На базе данной методологии с учетом мировых тенденций развития энергетики была разработана система показателей, характеризующих отдельные факторы устойчивого энергетического развития (таблица 1), и на их основе интегральный показатель – индекс устойчивого энергетического развития (рис. 1). Предложенный индекс позволяет оценить текущий уровень устойчивого энергетического развития и проследить его динамику по годам, а также сравнить положение страны с другими странами. Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития, включает не только традиционные для устойчивого развития экономическую, социальную и экологическую группы показателей, но и технологические, выделенные в отдельную группу. В индексе сбалансированы показатели по внешним и внутренним факторам. Оценивать устойчивое энергетическое развитие страны можно как в целом, так и по отдельным факторам и подсистемам показателей. Одним из этапов методики является нормирование показателей, которое позволяет привести их к единому диапазону. Применение интегрального индекса, характеризующего уровень устойчивого энергетического развития, является целесообразным при разработке стратегии устойчивого энергетического развития [10].

Таблица 1. Система показателей устойчивого энергетического развития

Факторы	Наличие ресурсов	Направление социально-экономического развития	Спрос на энергоресурсы	Энерго-безопасность
Экономический	Доступность кредитных ресурсов	Доля энергетики в ВВП	Уровень рентабельности энергетики	Доля недоминирующих энергоресурсов в общем объеме импорта энергоресурсов
Технологический	Доля собственных энергоресурсов в общем энергопотреблении	Доля инвестиций в энергетику	Энергоемкость ВВП	Доля резервных мощностей в общих мощностях энергетики
Социальный	Уровень занятости	Уровень образования	Доступность топлива и энергии для населения	Уровень электрификации населения
Экологический	Уровень озеленения страны	Уровень здоровья	Коэффициент сокращения потребления энергоресурсов	Уровень выбросов CO ₂ от потребления энергии на душу населения

Расчет интегрального индекса, характеризующего уровень устойчивого энергетического развития страны, осуществляется по следующей формуле:

$$I = \sum_{j=1}^k z_j \sum_{i=1}^{m_j} x_{ij} f_{ij}, \quad (1)$$

где I – интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития страны;

k – количество факторов;

z_j – вес j -ого фактора;

m_j – количество показателей j -го фактора;

x_{ij} – значение i -ого показателя для j -ого фактора;

f_{ij} – вес i -ого показателя для j -ого фактора.

Анализ состояния устойчивого энергетического развития Республики Беларусь.

На рис. 1 представлен интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.

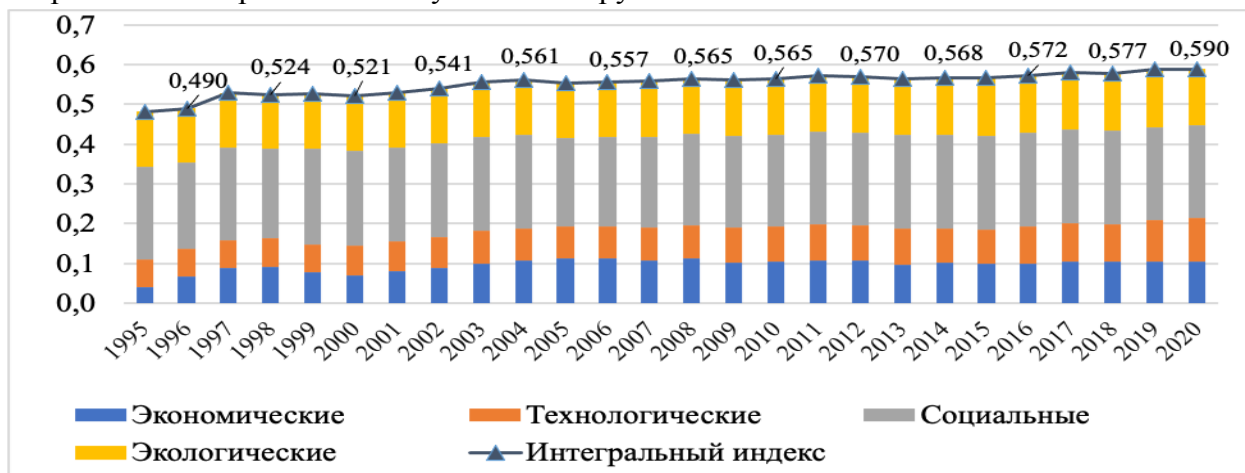


Рис. 1. Интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь [11]

Интерпретация интегральной оценки:

от 0,8 до 1,0 – сбалансированное устойчивое развитие;

от 0,6 до 0,8 – высокий уровень устойчивого развития;

от 0,4 до 0,6 – средний уровень устойчивого развития;

от 0,2 до 0,4 – низкий уровень устойчивого развития;

от 0,0 до 0,2 – неустойчивое развитие.

Как видно из рис. 1, наиболее высокого значения интегральный индекс, характеризующий уровень устойчивого энергетического развития Республики Беларусь, достиг в 2020 г. (0,590). Несущественные спады уровня устойчивого энергетического развития в исследуемый период наблюдались в 2000 г. (0,521), в 2009 г. (0,561) и в период 2012-2015 гг. (0,565-0,570). В целом, в 2020 г. уровень устойчивого энергетического развития страны увеличился в 1,22 раза по сравнению с 1995 г.

Для более детального анализа рассмотрим динамику групповых показателей по различным факторам, характеризующим устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь.

На рис. 2 представлен индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.

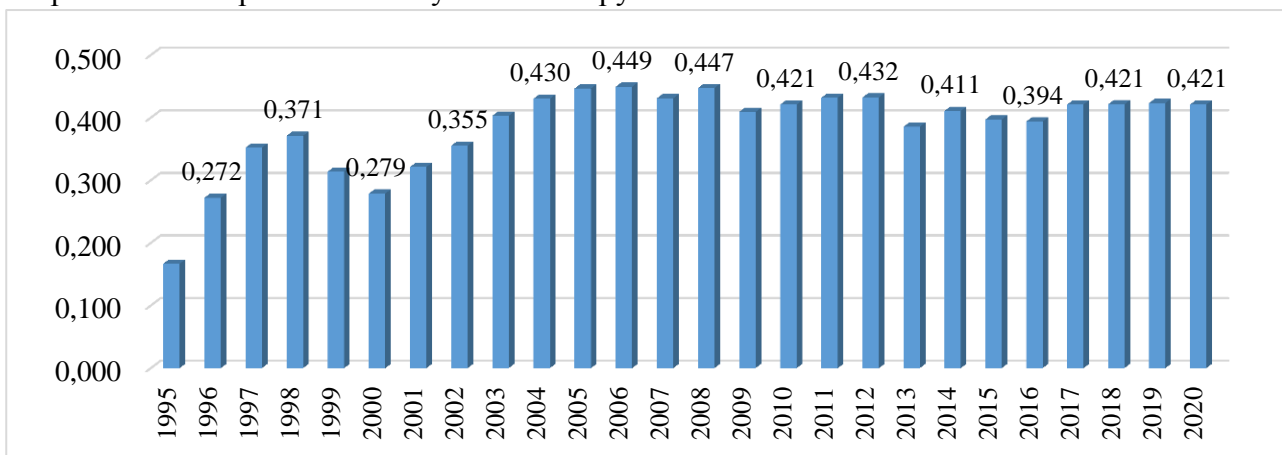


Рис. 2. Индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как видно из рис. 2, индекс, характеризующий экономические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг., отличается значительной степенью неравномерности. Его наибольшее значение было достигнуто в 2006 г. (0,449), наименьшее наблюдалось в 1995 г. (0,167). В целом, в 2020 г. групповой показатель увеличился на 52,41 % по сравнению с 1995 г.

На рис. 3 представлен индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.

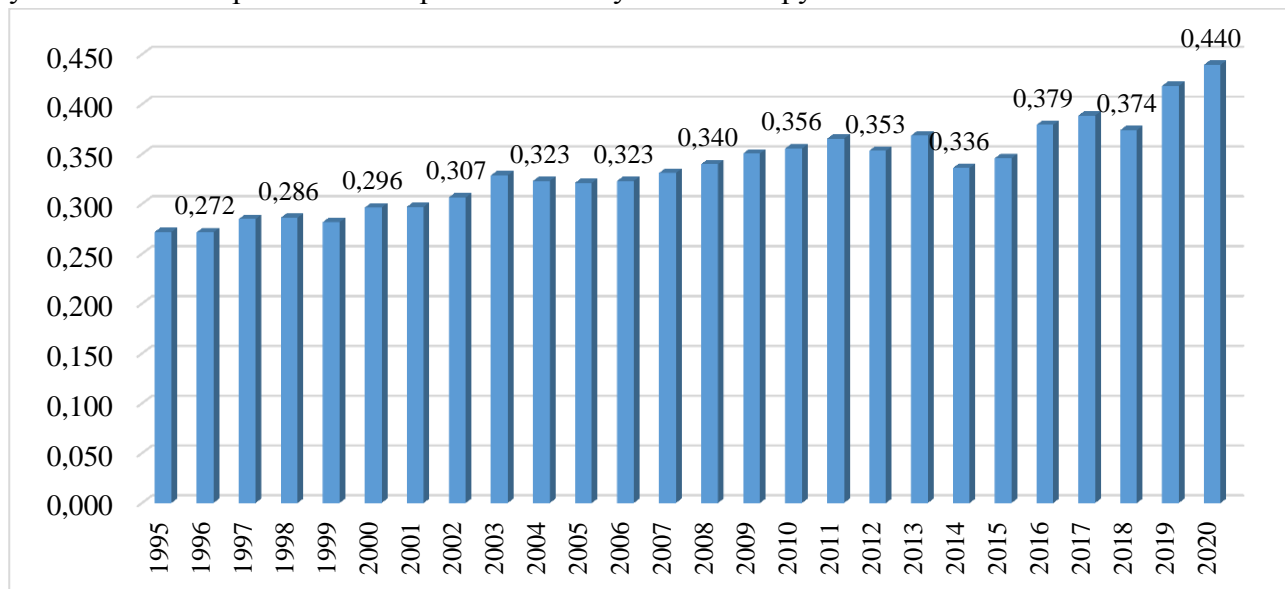


Рис. 3. Индекс, характеризующий технологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как видно из рис. 3, за исключением 2012, 2014, 2018 гг. для индекса, характеризующего технологические факторы, за исследуемый период был свойственен постоянный рост. В 2020 г. данный показатель увеличился по сравнению с 1995 г. в 1,62 раза. Наибольшее значение индекса достиг в 2020 г. (0,440), наименьшее – в 1995 г. (0,272).

На рис. 4 представлен индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.

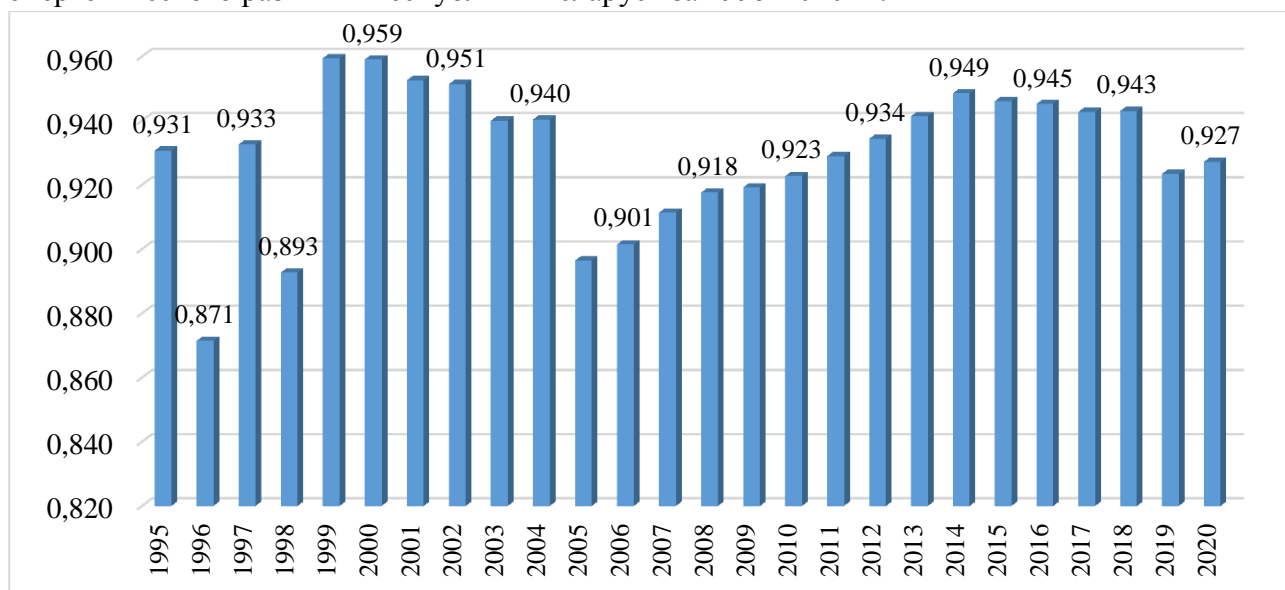


Рис. 4. Индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как следует из рис. 4, индекс, характеризующий социальные факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в 1995-2020 гг. отличался неравномерностью. В 2020 г. он снизился по сравнению с 1995 г. на 1,38 %. Наиболее высокого значения данный показатель достиг в 1999 г. (0,959), наименьшее значение наблюдалось в 1996 г. (0,871).

На рис. 5 представлен индекс, характеризующий экологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь за 1995-2020 гг.

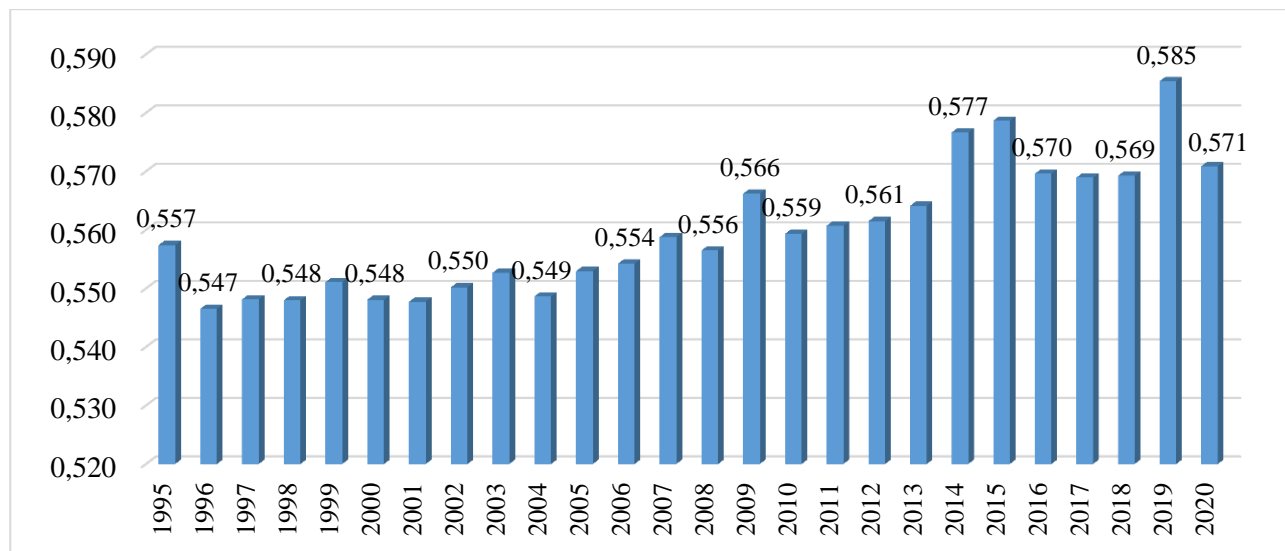


Рис. 5. Индекс, характеризующий экологические факторы устойчивого энергетического развития Республики Беларусь

Как следует из рис. 5, в 1995-2020 гг. групповому показателю, характеризующему экологические факторы устойчивого энергетического развития, была присуща положительная тенденция. В 2020 г. он увеличился по сравнению с 1995 г. на 2,4 %. Наиболее высокого значения данный показатель достиг в 2019 г. (0,585), наименьшее наблюдалось в 1996 г. (0,547).

Проведенное исследование показало, что в настоящее время Республика Беларусь характеризуется средним уровнем устойчивого энергетического развития (0,590 в 2020 г.), что свидетельствует об эффективности энергетического планирования и функционирования энергетического комплекса Республики Беларусь.

Основными направлениями устойчивого энергетического развития Республики Беларусь до 2030 г. являются:

- энергосбережение и внедрение энергоэффективных технологий;
- диверсификация энергоресурсов и энергоисточников за счет использования ВИЭ (возобновляемых источников энергии) и использования атомной энергетики;
- формирование оптового электроэнергетического рынка;
- снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу.

Согласно Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года прогнозируется стабильный рост потребления электрической энергии в Республике Беларусь: с 39,7 млрд. кВт·ч в 2020 г. до 47,2 млрд. кВт·ч в 2030 г. (таблица 2). Вместе с тем следует отметить, что фактическая выработка электроэнергии на БелАЭС в 2020 г. составила 338 млн. кВт·ч, вместо запланированных 2623 кВт·ч, а в 2021 г. – 5780 млн. кВт·ч, вместо запланированных 8123 кВт·ч.

Таблица 2. Прогноз баланса производства-потребления электрической энергии в Республике Беларусь, млн. кВт·ч [12]

№ п/п	Показатель	Прогноз		
		2020	2025	2030
1.	Производство	39732	43734	47206
1.1.	ГПО «Белэнерго», в т.ч.:	34529	38521	41305
1.1.1.	КЭС	16454	4636	5784
1.1.2.	ТЭЦ	15074	14235	15871
1.1.3.	ВИЭ	378	405	405
1.1.4.	АЭС	2623	19245	19245
1.2.	Блок-станции, в т.ч.:	5203	5213	5901
1.2.1.	ископаемые виды	4397	4171	4206
1.2.2.	ВИЭ	806	1070	1695
2.	Импорт	0	0	0
3.	Экспорт	0	0	0
4.	Потребление, в т.ч.:	39732	43734	47206
4.1.	полезный отпуск потребителям, в т.ч.:	29615	31512	34752
4.1.1	реальному сектору экономики	22875	24515	27079
4.1.2.	Населению	6740	6997	7673
4.2.	потребление в Белорусской энергосистеме	6115	8553	8785
4.3.	собственные нужды организаций-владельцев блок-станций	4002	3669	3669

Несмотря на существующее в настоящее время отставание в темпах развития атомной энергетики в Республики Беларусь, она остается одним из важнейших векторов в энергетической политике республики.

Создание базы данных для моделирования. Для моделирования сценариев энергопроизводства Республики Беларусь в период с 2022 по 2050 гг. использовалась программа MESSAGE. Критерием, определяющим процесс расчета, в программе MESSAGE является функция оптимизации эксплуатационных затрат.

Для моделирования сценариев функционирования рынка была собрана база данных, включающая:

- установленную мощность всех энергогенерирующих источников в Республике Беларусь;
- инвестиционные затраты, переменные и постоянные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь (табл. 3, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- цены на основные энергоресурсы в Республике Беларусь (табл. 4, по данным Министерства энергетики Республики Беларусь);
- прогнозируемый объем потребления электроэнергии на период до 2030 года (рис. 1, по данным Национального статистического комитета Республики Беларусь) [13].

Таблица 3. Инвестиционные затраты, постоянные и переменные издержки основных производителей электроэнергии в Республике Беларусь

Энергоисточник	Инвестиционные затраты, долл. США/кВт	Постоянные издержки, долл. США/кВт/год	Переменные издержки, долл. США/ГВт·час
Лукомльская ГРЭС	700	10,34	2,39
Березовская ГРЭС	700	15,42	6,89

Минская ТЭЦ-5	1000	27,74	5,62
БелАЭС	5000	52	3
КЭС ПГУ большой мощности	750	14	28,4
Блок-станции	1400	24	10,5
Новые блок-станции	2289	73	44
ТЭЦ на МВТ	1200	24	10,5
ВЭУ	1740	57	0
СЭС	2366	15	0
Биогазовые блок-станции	3700	167	35
Минская ТЭЦ-4	800	32,83	15,66
Гомельская ТЭЦ	700	19,76	14,12
Бобруйская ТЭЦ-2	700	46,17	31,04
Гродненская ТЭЦ-2	700	61,01	38,89
Минская ТЭЦ-3	700	38,62	25,53
Могилевская ТЭЦ-2	800	27,61	27,16
Новополоцкая ТЭЦ	800	18,06	30,71
Мозырьская ТЭЦ	700	33,91	40,1
Светлогорская ТЭЦ	700	31,36	32,38
Витебская ТЭЦ	700	45,92	39,28
Жодинская ТЭЦ	800	35,27	49,76
Оршанская ТЭЦ	800	48,89	34,31
Малые ТЭЦ	700	63,27	92,35
ГЭС	1508	30	3,5
ПГУ Минской ТЭЦ-3	900	12	24,5
Лидская ТЭЦ	750	18	42
Жлобинская ТЭЦ	1200	22	9,1
Блоки в ремонтном резерве	750	14,5	55,2

Таблица 4. Стоимость топлива в период 2020-2050 гг. в Республике Беларусь

Вид топлива	Газ природный, долл. США /тыс. м ³	Газ сжиженный, долл. США /тыс. м ³	Мазут топочный, долл. США /т	Мазут топочный (для населения), долл. США /т	Ядерное топливо, долл. США /кг	Древесина, долл. США /плотный м ³	Торф, долл. США /т
2020	127,45	188,74	190,84	203,70	57,49	23,95	30,61
2021	128,53	195,19	192,13	202,34	47,59	24,54	31,36
2022	212,52	201,86	193,40	201,00	49,67	24,54	31,36
2023	221,98	208,76	194,46	199,90	49,67	24,54	31,36
2024	228,80	215,90	195,76	198,58	49,67	24,54	31,36
2025	234,47	223,28	197,04	197,29	49,67	24,54	31,36
2026	239,02	215,98	195,75	198,58	49,67	24,54	31,36
2027	243,18	218,38	196,18	198,15	49,67	24,54	31,36
2028	245,45	219,21	196,32	198,01	49,67	24,54	31,36
2029	246,26	217,86	196,08	198,25	49,67	24,54	31,36
2030	247,00	218,49	196,20	198,13	49,67	24,54	31,36
2031	247,74	219,15	196,77	198,13	49,67	24,54	31,36

2032	248,49	219,81	196,89	198,13	49,67	24,54	31,36
2033	249,23	220,47	197,01	198,13	49,67	24,54	31,36
2034	249,98	221,13	197,13	198,13	49,67	24,54	31,36
2035	250,73	221,79	197,25	198,13	49,67	24,54	31,36
2036	251,49	222,46	197,37	198,13	49,67	24,54	31,36
2037	252,24	223,13	197,49	198,13	49,67	24,54	31,36
2038	253,00	223,80	197,61	198,13	49,67	24,54	31,36
2039	253,76	224,47	197,73	198,13	49,67	24,54	31,36
2040	254,52	225,15	197,85	198,13	49,67	24,54	31,36
2041	255,29	225,82	197,97	198,13	49,67	24,54	31,36
2042	256,06	226,50	198,10	198,13	49,67	24,54	31,36
2043	256,82	227,18	198,22	198,13	49,67	24,54	31,36
2044	257,60	227,86	198,34	198,13	49,67	24,54	31,36
2045	258,37	228,55	198,46	198,13	49,67	24,54	31,36
2046	259,15	229,23	198,58	198,13	49,67	24,54	31,36
2047	259,93	229,92	198,70	198,13	49,67	24,54	31,36
2048	260,71	230,61	198,82	198,13	49,67	24,54	31,36
2049	261,49	231,31	198,95	198,13	49,67	24,54	31,36
2050	262,28	232,00	199,07	198,13	49,67	24,54	31,36

Для прогнозирования структуры энергопроизводства была построена формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь, которая схематично представлена на рис. 6.

Построение сценариев.

Цель моделирования энергосистемы – спрогнозировать нагрузку каждого типа энергогенерирующих мощностей таким образом, чтобы минимизировать совокупные эксплуатационные затраты.

Введем следующие переменные:

Z_{nmlt} - количество сырья m , потребленного станцией n для производства энергии вида l в период t ;

U_{nmlt} - производство энергии вида l станцией n на сырье вида m в период t ;

R_{mt} - добыча ресурса вида m в период t ;

I_{mt} - импорт ресурса вида m в период t ;

I_{et} - импорт энергии в период t ;

vom_{nm} - переменные затраты станции n при работе на ресурсе m ;

c_{lt} - стоимость ресурса l в период t ;

ci_{lt} - стоимость импортируемого ресурса l в период t ;

k_{nmlt} - КИУМ n –станции, работающей на m –виде ресурсов, производящей l вид энергии в период t ;

pow_{nt} - мощность n - ой станции в период t ;

U_{lt} - величина спроса на энергию l в период t ;

\bar{R}_{lt} - ограничения по добыче ресурса l в период t .

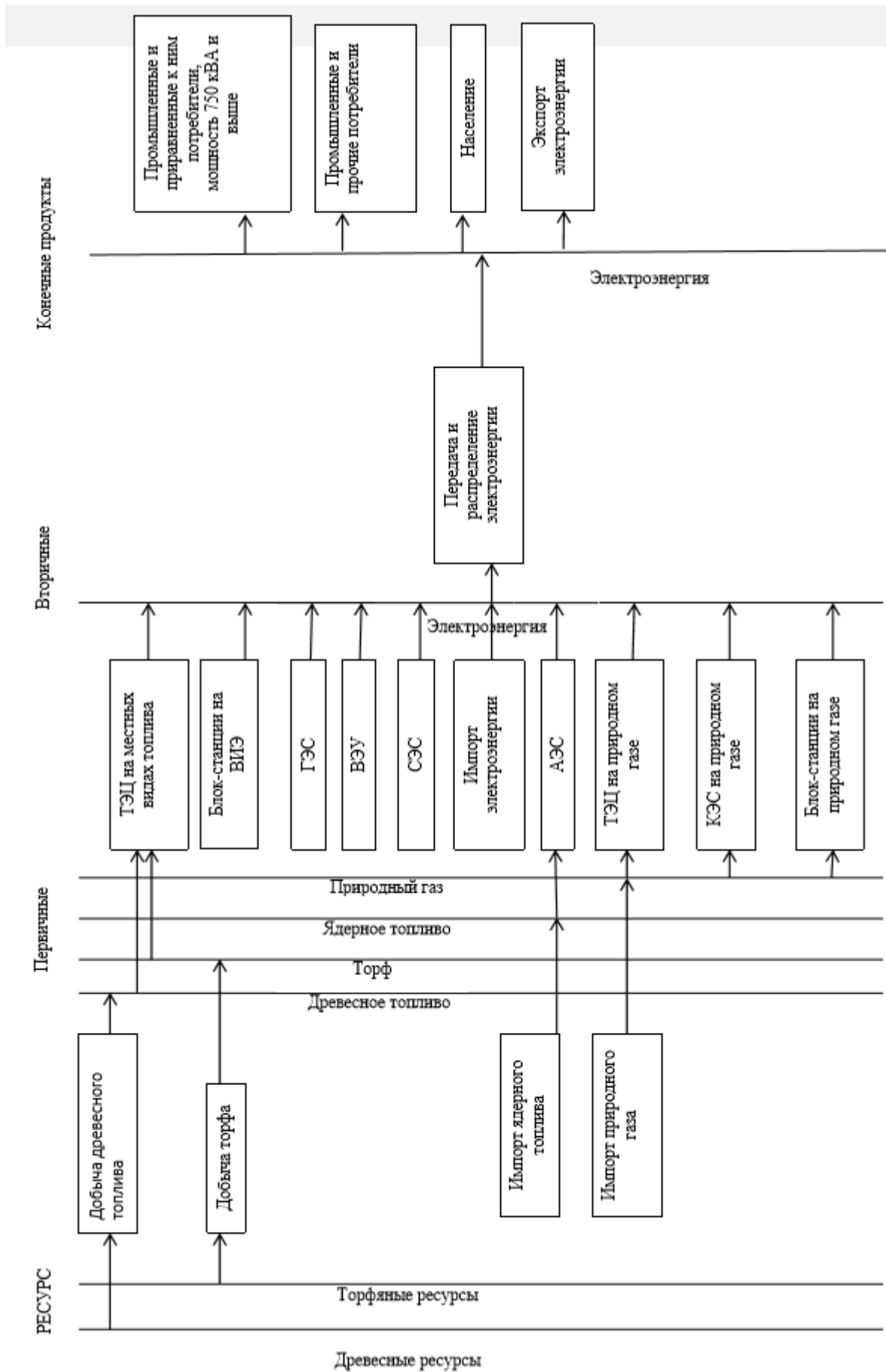


Рис. 6. Формализованная модель энергетической системы Республики Беларусь

Критерием оптимальности модели являются суммарные эксплуатационные затраты. Они включают в себя: капитальные, постоянные и переменные затраты. Итак, целевая функция включает переменные затраты, затраты на ресурсы и затраты на импорт электроэнергии. Первое слагаемое целевой функции описывает затраты на закупку ресурсов, второе – переменные затраты на обслуживание станций, третье – затраты на импорт электроэнергии. Суммирование по t задает динамику по годам:

$$f = \sum_l \sum_t (R_{mt} c_{mt} + I_{mt} ci_{mt}) + \sum_n \left(\sum_m \sum_t \left(\sum_l U_{nmlt} \right) vom_{mt} \right) + \sum_t \sum_l I_{et} ci_{et} \rightarrow \min \quad (2)$$

Ограничения можно разделить на несколько групп:

1. Балансовые соотношения по распределению ресурсов показывают объемы потребленного ресурса с учетом ограничений по их добыче. Такие соотношения в модели описывают балансы по мазуту, торфу, дровам, ядерному топливу. По условию, ограничений на закупку газа не установлено. Кроме того, учитывается, что каждый ресурс поступает из одного источника – либо собственная добыча, либо импорт.

$$\sum_{n,l} z_{nmlt} \leq R_{mt} + I_{mt} \quad (3)$$

2. Ограничения по мощности станций. Это ограничение показывает максимальные объемы производимой энергии каждой из станций.

$$\sum_{m,l} U_{nmlt} \leq pov_{nt} \quad (4)$$

Здесь необходимо учесть взаимосвязь между параметрами:

$$U_{nmlt} = k_{nmlt} z_{nmlt} \quad (5)$$

Это уравнение показывает взаимосвязь между потребленным количеством ресурса и произведенной энергией.

3. Ограничения по потреблению сырья.

$$R_{mt} \leq \bar{R}_{mt} \quad (6)$$

4. Ограничение по спросу на энергию.

$$\sum_n \sum_m U_{nmlt} E_{lt} + I_{lt} \geq U_{lt} \quad (7)$$

Левая часть ограничения описывает количество произведенной и закупленной энергии, правая – прогнозируемый спрос на энергию (электрическую либо тепловую) [14].

Для прогнозирования структуры энергопроизводства в программе MESSAGE были выбраны три сценария развития энергосистемы на период 2022-2050 г.:

- 1) сценарий 1, основанный на темпах роста потребления электрической энергии, заложенных в прогнозном балансе топливно-энергетических ресурсов до 2030 г. [15];
- 2) сценарий 2, предусматривающий стабильный спрос на электроэнергию, начиная с 2030 г.;
- 3) сценарий 3, базирующийся на текущих тенденциях потребления электроэнергии [7].

Динамика фактической выработки электроэнергии (2014-2020 гг.) и ее прогноз (2022-2050 гг.) в Республике Беларусь для трех сценариев представлены на рис. 7.

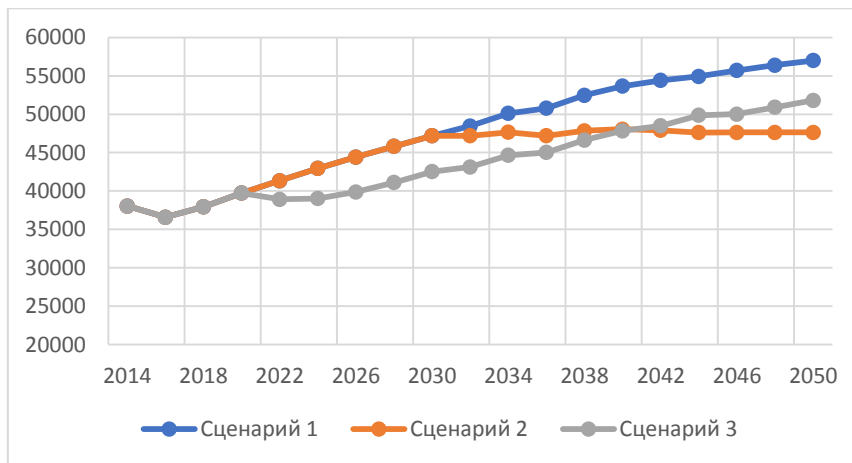


Рис. 7. Выработка электроэнергии, млн. кВт·ч

Как видно из рис. 7, к концу 2050 г. выработка электроэнергии вырастет при реализации любого сценария. Постепенное увеличение электропотребления соответствует как курсу страны на электрификацию транспорта и теплоснабжения, развитию энергоемких производств, так и принципам устойчивого развития, так как электроэнергия является чистым источником энергии.

Результаты моделирования. Первый сценарий развития энергосистемы основан на сохранении тенденции прироста потребления электроэнергии, положенного в основу Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года.

К концу 2050 г. выработка электроэнергии вырастет с прогнозируемых 41332 млн. кВт·ч в 2022 году до 56996 млн. кВт·ч (рис. 7). Для удовлетворения растущих потребностей в электрической энергии, с учетом необходимости вывода из эксплуатации выработавших свой ресурс мощностей, необходимо строительство новых, динамика ввода которых представлена на рис. 8.

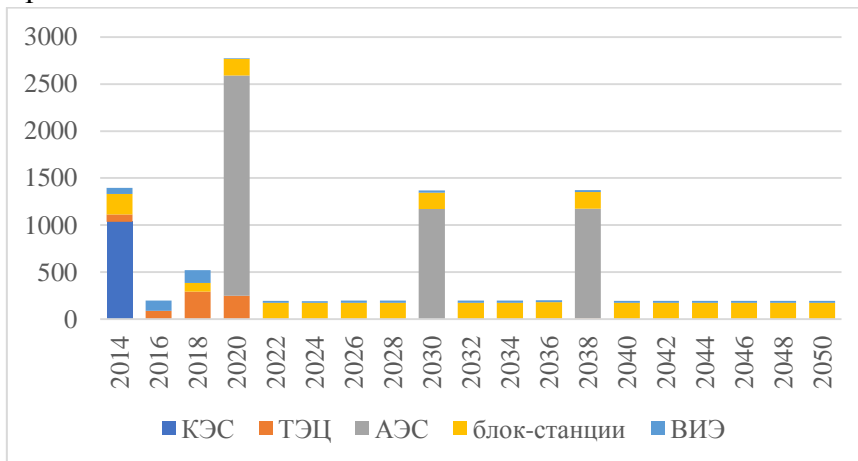


Рис. 8. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 1

Наиболее крупным новым объектом электрогенерации является БелАЭС мощностью 2340 МВт, ввод в эксплуатацию двух блоков которой планируется закончить к началу 2022 года. Однако для покрытия роста спроса на электроэнергию в будущем потребуются ввод еще двух блоков по 1170 МВт на ядерном топливе: в 2030-2031 гг. и 2038-2039 гг. После ввода третьего и четвертого блоков БелАЭС доля БелАЭС в производстве электроэнергии увеличивается с 39,7% в 2022 году до 50,8% в 2030 и 61,1% в 2040. Снижение доли БелАЭС к 2050 году до 58,3% обусловлено ростом общей выработки электроэнергии в стране.

При рассмотрении структуры источников в выработке электроэнергии, представленной на рис. 9, заметно значительное снижение доли КЭС: с 48,3% в 2020 году до 20,5% в 2030 и только 11,3% в 2050 – обусловленное вводом БелАЭС.

Доля ТЭЦ в периоде до ввода третьего блока БелАЭС снижается в меньшей степени: с 32,1% в 2020 году до 26,7% в 2030. Этот факт обусловлен работой ТЭЦ по тепловому графику, где основная задача электростанции заключается в обеспечении потребителя тепловой, а не электрической энергией, последняя выступает как второстепенный продукт.

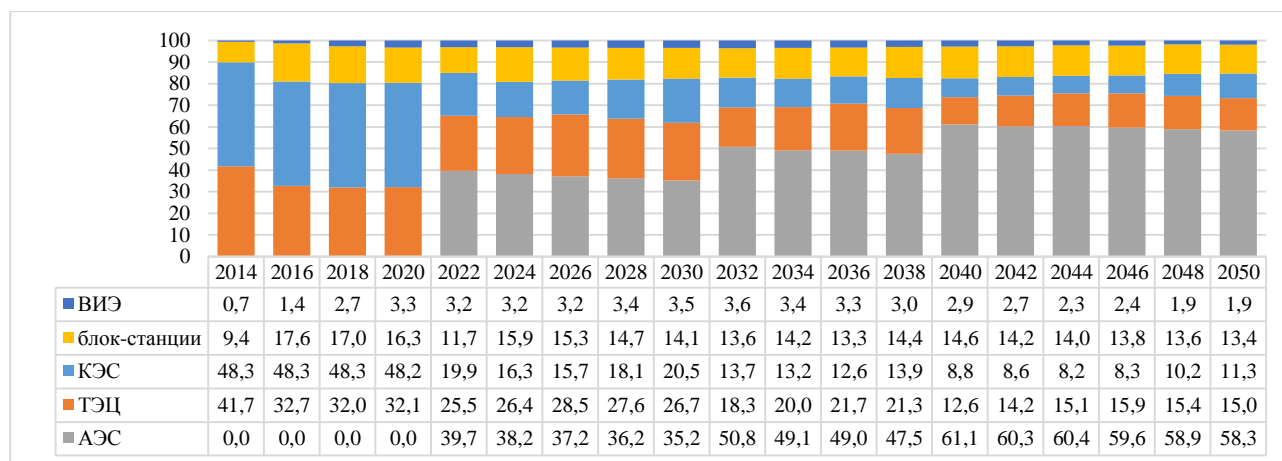


Рис. 9. Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 1

Динамика структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии является наиболее интересным показателем с точки зрения энергетической безопасности и представлена на рис. 10.

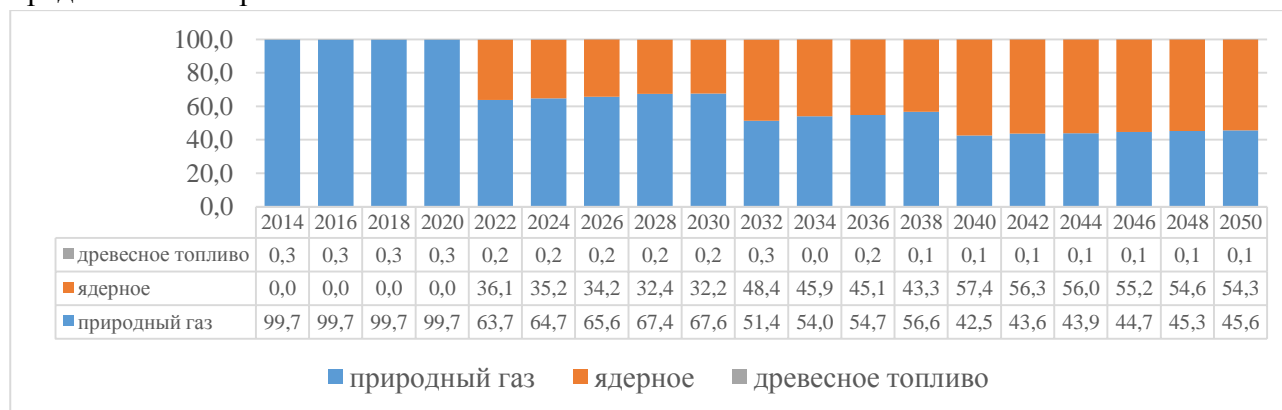


Рис. 10. Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 1

Доля доминирующего вида топлива в производстве электроэнергии – природного газа – уменьшается с 99,7% в 2020 году до 63,7% в 2022 году, что меньше 70% и соответственно уже не является критическим значением. Снижение доли природного газа происходит при вводе в эксплуатацию каждого блока БелАЭС: при вводе третьего – до 51,4%, а при вводе четвертого – до 42,5%, где природный газ уступает позицию доминирующего источника ядерному топливу с показателем 57,4%. К концу прогнозируемого периода значения показателей сближаются и составляют 45,6% и 54,3% для природного газа и ядерного топлива соответственно.

Доля древесного топлива в производстве электроэнергии постепенно падает с 0,3% в 2020 году до 0,1% в 2050. Небольшой объем новых вводимых мощностей в первую очередь

ограничивается запасами возобновляемой древесины и изменением распределения ее потоков между отраслями промышленности.

В основу второго сценария развития энергосистемы положен прогноз, представленный в Концепции развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года, после 2030 года потребление энергии принято неизменным.

К концу рассматриваемого периода выработка электроэнергии увеличится с 41332 млн. кВт·ч в 2022 году до 47626 млн. кВт·ч (рис. 7), что на 16 процентов меньше, чем конечное значение для предыдущего сценария. Следовательно, при таком варианте развития энергосистемы дефицит электроэнергии будет ощущаться в меньшей степени и потребуются ввод электрогенерирующих мощностей в меньшем объеме.

В то же время рост выработки электроэнергии невозможно обеспечить за счет уже существующих мощностей, особенно с учетом износа производственных фондов. Снабжение страны электрической энергией потребует строительства и ввода в эксплуатацию новых электрогенерирующих мощностей (рис. 11).

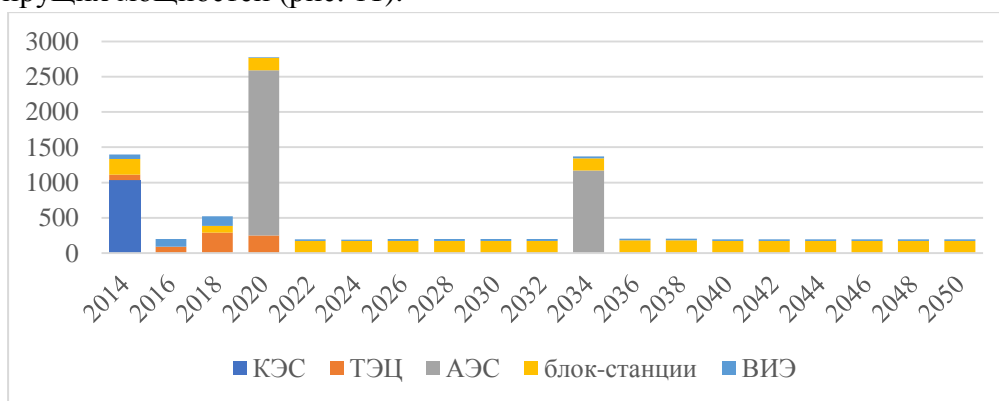


Рис. 11. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 2

В данном сценарии кроме наиболее крупного объекта электрогенерации – БелАЭС мощностью 2340 МВт, потребуются ввод еще только одного блока БелАЭС мощностью 1170 МВт, его пуск будет необходим к 2034 году, чтобы покрыть растущее потребление электроэнергии. Кроме этого, ожидается постепенный ввод блок-станций в среднем по 175 МВт ежегодно, а также небольшое количество источников возобновляемой энергетики.

После ввода третьего блока БелАЭС доля АЭС в производстве электроэнергии увеличивается с 39,7% в 2022 году до 52,1-52,3% в 2050. Структура всех источников в выработке электрической энергии представлена на рис. 12.

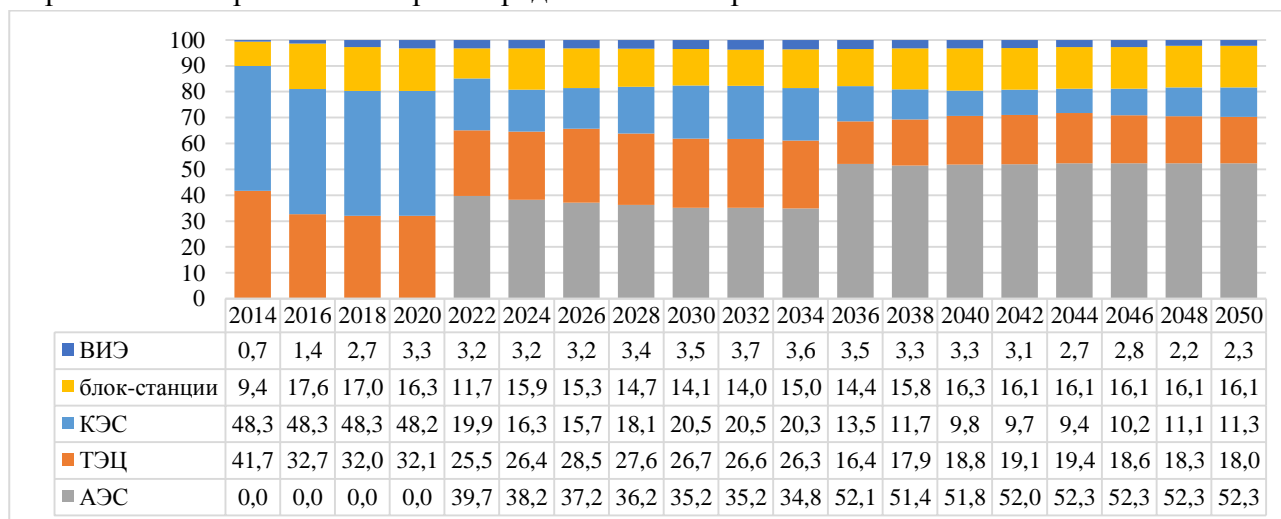


Рис. 12. Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 2

Здесь, как и в первом сценарии, заметно значительное снижение доли КЭС: с 48,2% в 2020 году до 19,9% в 2022 и 13,5% к 2050 году.

Динамика изменения доли ТЭЦ более плавная, но также имеет тенденцию к снижению и характеризуется следующими значениями: 32,1% в 2020 году, 25,5% в 2022, 16,4% в 2036. Небольшой рост будет наблюдаться к концу рассматриваемого периода – до 18,0% к 2050 году. Большая доля, по сравнению с первым сценарием, имеет место по причине меньшего роста выработки электроэнергии и задачей ТЭЦ будет обеспечение страны не только электрической, но и тепловой энергией.

Динамика структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии представлена на рис. 13.

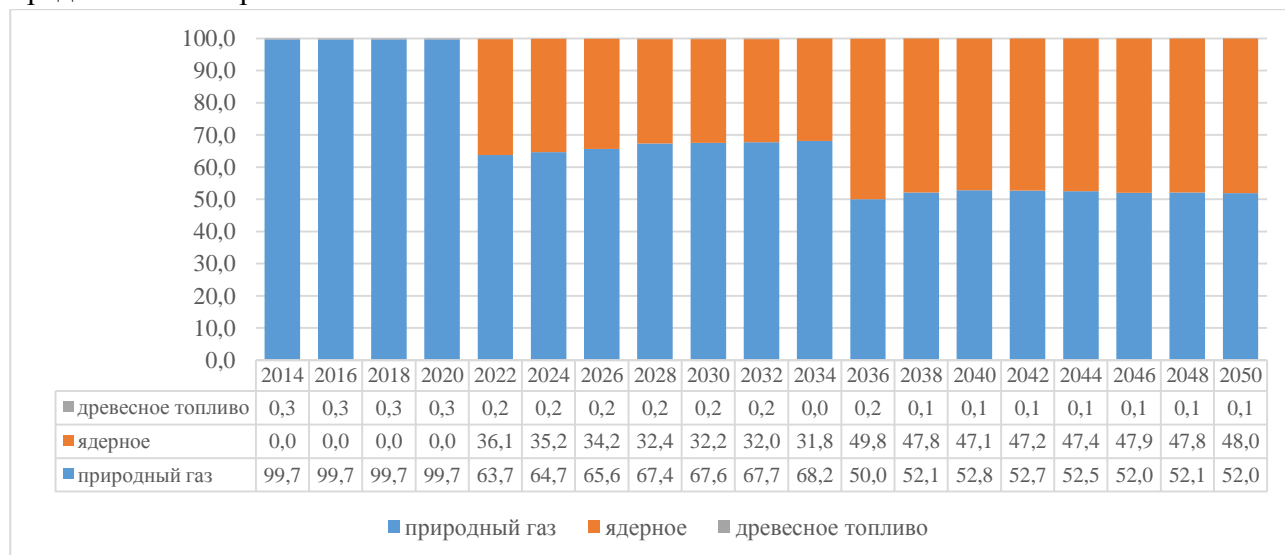


Рис. 13. Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 2

Доля доминирующего вида топлива в производстве электроэнергии – природного газа – уменьшается до 63,7% в 2022 году при пуске в работу первых двух блоков атомной электростанции и до 50,0% в 2036 году после запуска третьего. Впоследствии доля газа постепенно увеличивается и достигает 68,2% в 2034 году и 52,0% в 2050. Соблюдение баланса между двумя доминирующими видами топлива положительно влияет на уровень энергетической безопасности страны и свидетельствует о гармоничном развитии отрасли.

Исходные данные для третьего сценария получены путем экстраполяции существующей тенденции производства электроэнергии в Республике Беларусь в последнее десятилетие на период до 2050 года.

В рассматриваемом сценарии рост выработки электроэнергии происходит не так стремительно: к 2022 году достигается значение только 38921 млн. кВт·ч, а значение показателя 2022 года предыдущих двух сценариев находится в промежутке между 2028 и 2030 годами. Однако к концу периода выработка энергии становится равной 51800 млн. кВт·ч, что превышает значение второго сценария на 8 процентов, но меньше показателя первого сценария на 9 процентов (рис. 7). В данном сценарии прирост установленных мощностей ожидается в более поздние сроки в связи с более плавным ростом производства электроэнергии.

Увеличение выработки электрической энергии потребует ввода новых энергогенерирующих мощностей, производящих только электрическую энергию, что обусловлено тенденцией к снижению выработки тепловой энергии. Динамика ввода новых мощностей по третьему сценарию развития энергосистемы представлена на рис. 14.

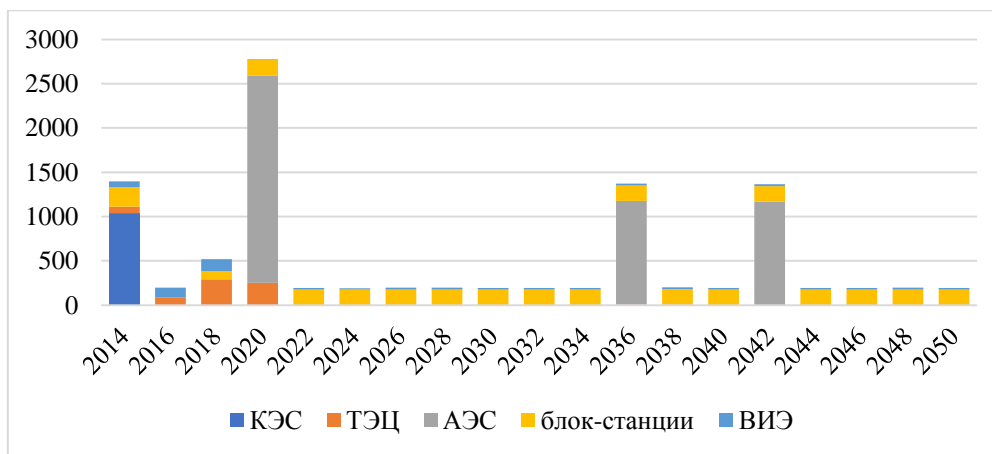


Рис. 14. Структура ввода новых мощностей, МВт, сценарий 3

В третьем сценарии, как и в первом, ожидается, кроме ввода БелаЭС к 2022 году мощностью 2340 МВт, ввод еще двух блоков по 1170 МВт на ядерном топливе. Однако ввод их будет необходим в более позднем периоде: в 2036 и 2042 годах по сравнению с 2030 и 2038 годами в первом сценарии. Данный факт обусловлен более плавным темпом роста выработки электроэнергии в стране по третьему сценарию.

Структура источников в выработке электроэнергии представлена на рис. 15. Доля БелаЭС будет увеличиваться с 42,1% с 2022 году до 52,7% в 2038 после запуска третьего блока и до 65,8% в 2044 году после запуска четвертого.

Доля КЭС и ТЭЦ значительно снизится и составит 21,2% и 26,6% соответственно в 2022 году, 12,0% и 15,8% в 2038 году и только 9,0% и 7,3% в 2044. К 2050 году их доля несколько увеличится – до 8,5% и 11,3%. Низкая доля ТЭЦ в покрытии нагрузки по электрической энергии может вызвать необходимость активного строительства электротепловых для компенсации недостатка тепловой энергии.

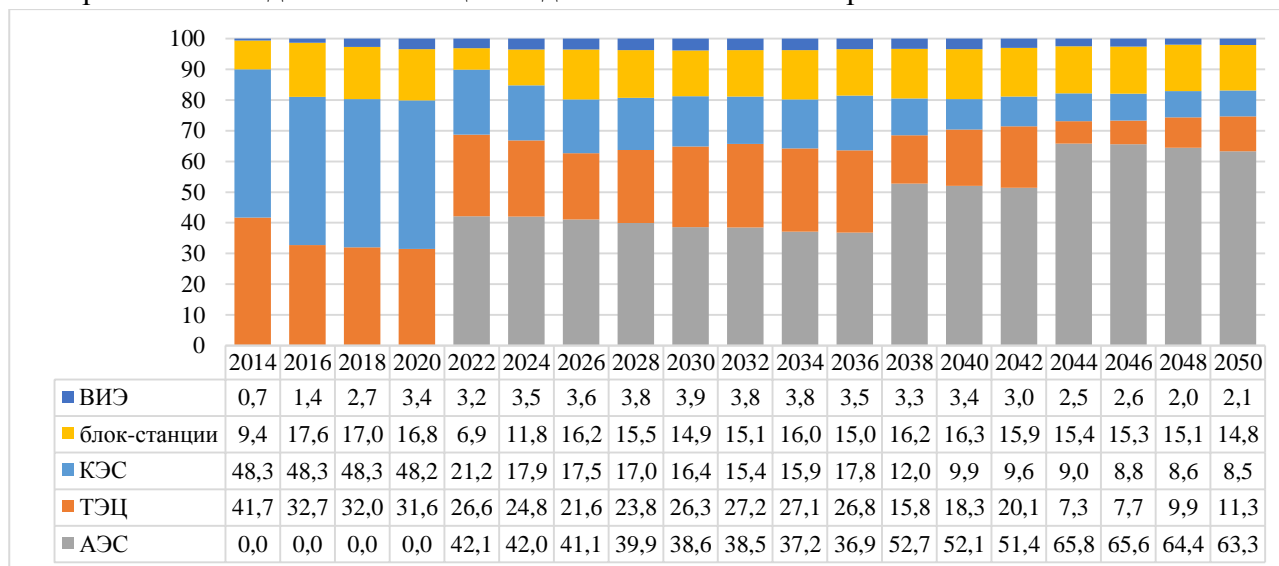


Рис. 15. Доля источников в выработке электроэнергии, в %, сценарий 3

Изменение структуры видов топлива в структуре производства электроэнергии представлено на рис. 16.

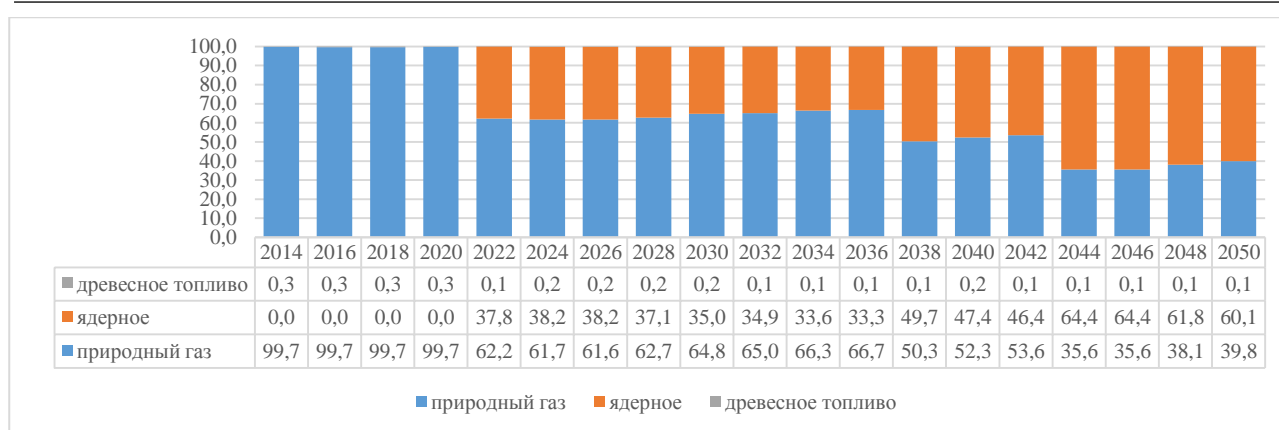


Рис. 16. Доля видов топлива в производстве электроэнергии и централизованном теплоснабжении, в %, сценарий 3

Доля природного газа в данном сценарии уменьшается до 62,2% в 2022 году при пуске в работу первых двух блоков атомной электростанции и до 50,3% в 2038 году после запуска третьего блока и до 35,6% в 2044 при запуске четвертого. Впоследствии доля газа несколько увеличивается до момента ввода нового блока БелАЭС, как и в ранее рассмотренных сценариях, что объясняется компенсацией роста спроса на электроэнергию при полной загрузке БелАЭС.

Стоимость производства электрической энергии в периоде 2014-2050 гг. для трех сценариев представлена на рис. 17.

Как видно из рис.17, пики роста стоимости производства электроэнергии во всех сценариях совпадают с вводом в эксплуатацию крупных электрогенерирующих мощностей (блоков БелАЭС) и обусловлены капитальными вложениями, амортизационными отчислениями и обновлением основных производственных фондов энергетической отрасли.

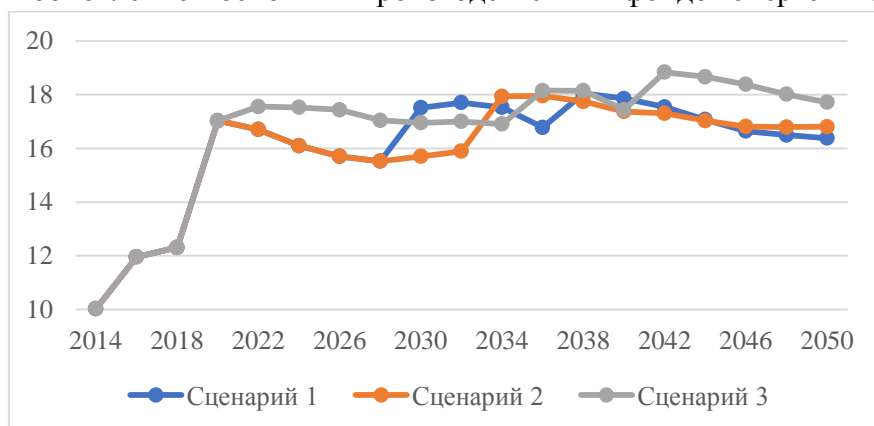


Рис. 17. Стоимость производства электроэнергии, центы, долл. США

Тенденция к постепенному снижению стоимости наблюдаются в трех сценариях: к 2050 году стоимость электроэнергии по сценарию 1 развития энергосистемы составит 16,38 центов, по сценарию 2 - 16,79 центов, что не превышает стоимости ее производства в 2020 году, равной 17,03. Более высокая стоимость 17,71 центов по сценарию 3 объясняется небольшим промежутком между вводом третьего и четвертого блоков, что не позволит цене производства нормализоваться и снизиться до значений предыдущих периодов.

Заключение. Результаты моделирования показали, что реализация того или иного сценария зависит от тенденций прироста потребления электрической энергии, на который, в свою очередь, значительное влияние оказывает темп экономического роста Республики Беларусь. Независимо от реализуемого сценария развитие атомной энергетики в Республике Беларусь позволяет диверсифицировать структуру топливно-энергетического баланса и

заместить часть природного газа, и, как следствие, снизить удельный вес газа при производстве энергии; уменьшить выбросы парниковых газов в атмосферу; придать качественно новый интеллектуальный и технологический импульс развитию страны и обеспечить дополнительные гарантии укрепления государственной независимости и экономической безопасности Республики Беларусь.

Основными направлениями устойчивого энергетического развития Республики Беларусь в условиях интеграции в энергетическую систему АЭС на период до 2030 г. являются:

- Дальнейшее развитие электротранспорта.
- Использование электроэнергии в жилищном строительстве для отопления и горячего водоснабжения.
- Повышение доли использования электрической энергии в железнодорожном транспорте.
- Создание и развитие электроёмких производств (водородная энергетика, цементная промышленность, цветная металлургия, химическая промышленность и др.).

Список источников

1. Михалеви́ч А.А. Атомная энергетика: перспективы для Беларуси. /А.А. Михалеви́ч –Минск: Беларус. Навука, 2011.– 262 с.
2. Михалеви́ч А.А Атомная энергетика. Перспективы для Беларуси. / А.А. Михалеви́ч – Litres, 2022.
3. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 23 декабря 2015 г. –№ 1084.
4. Абайдулин А.А. Атомная энергетика как гарант международной безопасности / А.А. Абайдулин, Е.Г. Костылева //Актуальные вопросы экономики и управления в нефтегазовом бизнесе, 2019. – С. 3-5.
5. Грачёв В.А. Экология, цифровизация и атомная энергетика / В.А. Грачёв //Энергия: экономика, техника, экология, 2020. – Т. 6. – С. 35-43.
6. Великороссов В.В. и др. Тенденции развития атомной энергетики в экономике разумного потребления / В.В. Великороссов и др //ББК 65.5 Гло 547 Серия «Библиотека Национального исследовательского института мировой экономики и международных отношений имени ЕМ Примакова» Рецензенты, 2019. – С. 153.
7. Разикова Н.И., Кочегарова К.А., Патраков Э.В. Атомная энергетика и качество жизни населения / Н.И. Разикова, К.А. Кочегарова, Э.В. Патраков //XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс, 2018. – Т. 7. – №. 4. – С. 297-302.
8. Нигматулин Б.И. Атомная энергетика в мире. Состояние и прогноз до 2050 года / Б.И. Нигматулин //Материаловедение. Энергетика, 2019. – Т. 25. – №. 4. – С. 6-22.
9. Семикашев В. В. Атомная энергетика: пик пройден или есть возможности роста? / В. В. Семикашев //Энергетическая политика, 2020. – №. 11 (153). – С. 12-21.
10. Зорина Т.Г. Формирование стратегии устойчивого энергетического развития. /Т.Г. Зорина. – Минск: Мисанта, 2016. – 332 с.
11. Зорина Т.Г. Устойчивое энергетическое развитие Республики Беларусь: анализ динамики развития в 1995–2018 гг. //Устойчивое развитие энергетики Республики Беларусь: состояние и перспективы: сборник докладов Международной научной конференции (Минск, 1-4 октября 2020). /Т.Г. Зорина. – Минск.: Беларус. Навука, 2020. – С. 18–33.
12. Концепция развития электрогенерирующих мощностей и электрических сетей на период до 2030 года. //Приложение к постановлению Министерства энергетики Республики Беларусь 25 февраля 2020. – № 7. – URL: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi (дата доступа 09.06.2022).
13. Зорина Т. Г. Интеграция возобновляемых источников энергии в структуру энергопроизводства Республики Беларусь: сценарное моделирование / Т.Г. Зорина. //Информационные и математические технологии в науке и управлении, 2021. – №. 1. – С. 66-79.
14. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. Vienna, 2004, 244 p.

15. Зорина Т.Г. Развитие атомной энергетики в Республике Беларусь: сценарное моделирование /Т.Г. Зорина // Вестник Белорусского государственного экономического университета, 2021. – № 6(149). – С. 21-30.

Зорина Татьяна Геннадьевна. Доктор экономических наук, профессор, заведующая сектором «Экономика энергетики» Института энергетики Национальной академии наук Беларуси, AuthorID: 84240, SPIN-код: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by, Беларусь, г. Минск.

UDC 620.92

DOI:10.38028/ESI.2022.27.3.006

Nuclear energy as one of the directions of sustainable energy development of the republic of Belarus

Tatsiana G. Zoryna

Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus,
Republic of Belarus, Minsk, *tanyazorina@tut.by*

Annotation. The article deals with the development of nuclear energy in the Republic of Belarus in the context of sustainable energy development. Based on the author's methodology, an analysis was made of the dynamics of sustainable energy development of the Republic of Belarus in 1995-2020. The directions of sustainable energy development of the Republic of Belarus up to 2030 have been determined. A formalized model of the energy system of the Republic of Belarus has been built, an initial data base has been collected for modeling the energy production of electric energy for the medium term in the MESSAGE program. Scenarios for the development of the energy system of the Republic of Belarus are constructed, taking into account the commissioning of the Belarusian nuclear power plant, depending on different rates of growth in demand for electricity. The forecasts of production and cost of electric energy in the energy system of the Republic of Belarus for the period up to 2050 were made according to the selected scenarios. A comparative analysis of the simulation results was carried out according to the following criteria: the structure of energy production, the volume and structure of commissioned capacities, fuel consumption for electricity generation, and the cost of electricity.

Keywords: sustainable energy development, sustainable energy development index, structure of energy production, nuclear energy, MESSAGE, scenario modeling, energy system of the Republic of Belarus, production cost of electricity

References

1. Mihalevich A.A. Atomnaya energetika: perspektivy dlya Belarusi [Nuclear energy: prospects for Belarus]. Minsk: Belarus. Navuka [Minsk: Belarusian science], 2011, 262p.
2. Mikhalevich A. Atomnaya energetika. Perspektivy dlya Belarusi [Nuclear energy. Prospects for Belarus]. Literes, 2022.
3. Konceptsiya energeticheskoy bezopasnosti Respubliki Belarus'. Postanovlenie Soveta Ministrov Respubliki Belarus' ot 23 dekabrya 2015 [The concept of energy security of the Belarus Republic. Resolution of the Council of Ministers of the Belarus Republic dated December 23, 2015], no. 1084.
4. Abaidulin A. A., Kostyleva E. G. Atomnaya energetika kak garant mezhdunarodnoy bezopasnosti [Nuclear power as a guarantor of international security]. Aktual'nyye voprosy ekonomiki i upravleniya v neftegazovom biznese [Topical issues of economics and management in the oil and gas business], 2019, pp. 3-5
5. Grachev V. A. Ekologiya, tsifrovizatsiya i atomnaya energetika [Ecology, digitalization and nuclear energy]. Energiya: ekonomika, tekhnika, ekologiya [Energy: economics, technology, ecology], 2020, vol. 6, pp. 35-43.
6. Velikorossov V.V. et al. Tendentsii razvitiya atomnoy energetiki v ekonomike razumnogo potrebleniya [Trends in the development of nuclear energy in the economy of reasonable consumption]. BБК 65.5 Glo 547 Seriya «Biblioteka Natsional'nogo issledovatel'skogo in-stituta mirovoy ekonomiki i mezhdunarodnykh otnosheniy imeni YEM Primakova» Retsenzenty [BBC 65.5 Glo 547 Series "Library of the National Research Institute of World Economy and International Relations named after EM Primakov" Reviewers], 2019, pp. 153.
7. Razikova N. I., Kochegarova K. A., Patrakov E. V. Atomnaya energetika i kachestvo zhizni naseleniya [Nuclear energy and quality of life of the population]. XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus [XXI century: results of the past and problems of the present plus], 2018, vol. 7, no. 4, pp. 297-302.

8. Nigmatulin B.I. Atomnaya energetika v mire. Sostoyaniye i prognoz do 2050 goda [Nuclear power in the world. Status and forecast until 2050]. Materialovedeniye. Energetika [Materialovedenie. Energy], 2019, vol. 25, no. 4, pp. 6-22.
9. Semikashev VV Atomnaya energetika: pik proyden ili yest' vozmozhnosti rosta? [Nuclear power: has the peak been passed or are there opportunities for growth?]. Energeticheskaya politika [Energy policy], 2020, no. 11 (153), pp. 12-21.
10. Zoryna T.G. Formirovaniye strategii ustojchivogo energeticheskogo razvitiya . [Formation of a strategy for sustainable energy development]. Minsk: Misanta, 2016, 332 p. (in Russian)
11. Zoryna T.G. Ustojchivoe energeticheskoe razvitiye Respubliki Belarus': analiz dinamiki razvitiya v 1995–2018 gg. [Sustainable energy development of the Republic of Belarus: analysis of the dynamics of development in 1995-2018.]. // Ustojchivoe razvitiye energetiki Respubliki Belarus': sostoyaniye i perspektivy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii (Minsk, 1-4 oktyabrya 2020) = Sustainable Energy Development of the Republic of Belarus: Status and Prospects: Collection of Papers of the International Scientific Conference (Minsk, October 1-4, 2020). Minsk.: Belarus. navuka = Minsk: Belarusian science, 2020, pp. 18–33 (in Russian).
12. Konceptsiya razvitiya elektrogeneriruyushchih moshchnostej i elektricheskikh setej na period do 2030 goda [Concept for the development of power generating capacities and electrical networks for the period up to 2030]. Prilozhenie k postanovleniyu Ministerstva energetiki Respubliki Belarus' 25 fevralya 2020. № 7. [Appendix to the Decree of the Ministry of Energy of the Republic of Belarus on February 25, 2020. No. 7.] Availabel at: https://minenergo.gov.by/zakonodatelstvo/koncepcii_i_proframmi/ (accessed: 09.06.2022) (in Russian).
13. Zoryna T. G. Integratsiya vozobnovlyayemykh istochnikov energii v strukturu energoproizvodstva Respub-liku Belarus': stsennarnoye modelirovaniye [Integration of renewable energy sources into the energy production structure of the Republic of Belarus: scenario modeling]. Informatsionnyye i matematicheskiye tekhnologii v nauke i upravlenii [Information and Mathematical Technologies in Science and Management], 2021, no. 1, pp. 66-79.
14. MESSAGE: Model for Energy Supply Strategy Alternatives and Their General Environmental Impacts / User Manual. Vienna, 2004, 244 p.
15. Zoryna T.G. Razvitiye atomnoj energetiki v Respublike Belarus': scenarnoe modelirovaniye [Nuclear power development in the Republic of Belarus: scenario modeling] // Vestnik Belorusskogo gosudarstvennogo ekonomicheskogo universiteta =Bulletin of the Belarusian State Economic University, 2021, no. 6(149), pp. 21-30 (in Russian).

Zorina Tatiana Gennadievna. *Doctor of Economics, Professor, Head of the Energy Economics Sector of the Energy Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, AuthorID: 84240, SPIN: 1455-9834, ORCID: 0000-0001-9665-2756, tanyazorina@tut.by, Republic of Belarus, Minsk.*

Статья поступила в редакцию 24.06.2022; одобрена после рецензирования 11.07.2022; принята к публикации 29.08.2022.

The article was submitted 06/24/2022; approved after reviewing 07/11/2022; accepted for publication 08/29/2022.