

**Заключение.** В работе представлены результаты моделирования генерации суммарной частоты в поверхностном оптически нелинейном слое диэлектрической сфероидальной частицы с использованием модели ВКБ. Произведено сравнение с результатами, полученными в рамках модели РГД, которое показало сходство формы диаграмм направленности генерируемого излучения для обеих моделей при различии максимальных значений плотности мощности излучения суммарной частоты. Полученные результаты согласуются с выводами аналогичных исследований для частиц сферической формы [5].

*Список использованных источников*

1. Size dependence of second-harmonic generation at the surface of microspheres / S. Viarbitskaya [et al.] // Physical Review A. – 2010. – Vol. 81, № 5. – P. 053850.
2. Шамына, А. А. Генерация суммарной частоты от тонкого сферического слоя. I. Аналитическое решение / А. А. Шамына, В. Н. Капшай // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 6. – С. 795–803.
3. Капшай, В. Н. Генерация суммарной частоты от тонкого сферического слоя. II. Анализ решения / В. Н. Капшай, А. А. Шамына // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125, № 1. – С. 71–78.
4. Шамына, А. А. Генерация суммарной частоты от тонкого цилиндрического слоя / А. А. Шамына, В. Н. Капшай // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124, № 1. – С. 105–121.
5. Капшай, В.Н. Генерация волн суммарной частоты в поверхностном слое сферической частицы / В. Н. Капшай, Е. Д. Головин, А. А. Шамына // Проблемы физики, математики и техники. Сер.: Физика. – 2022. – № 3 (52). – С. 22–27.

УДК 536.7:621.311

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩИХ СТАНЦИЙ**

*Стефаненко Н. В.*

УО «Национальный детский технопарк»

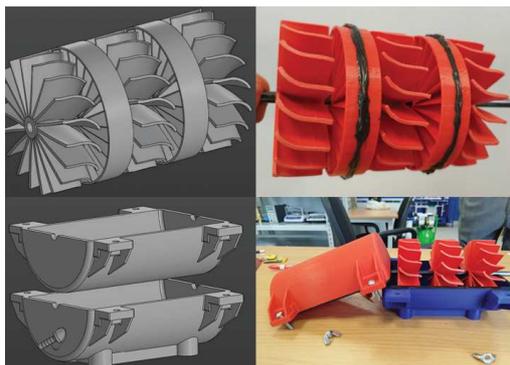
**Введение.** Ввод Белорусской АЭС, как источника базовой, но низкоманевренной генерации, создал в энергосистеме страны системную потребность в развитии маневренных мощностей и систем аккумулирования электроэнергии. Это необходимо для компенсации суточной неравномерности нагрузок и обеспечения надёжности. Данная задача соответствует государственным приоритетам в области энергоэффективности и устойчивости, закреплённым в Директиве № 3 и Комплексном плане развития электроэнергетики до 2030 года [1, 2]. Потребность в аккумулировании может значительно возрасти в случае ввода третьего блока на Белорусской АЭС [3].

**Материалы и методы.** В данном исследовании был проведён анализ известных систем накопления электроэнергии, их особенностей и перспектив. Подробно рассмотрены системы накопления на сжатом воздухе – воздушно-аккумулирующие станции (ВАС), их виды и специфика. Также выполнена сравнительная оценка существующих накопителей энергии. На основе действующих ВАС [4] установлено, что подобные системы обладают коэффициентом полезного действия (КПД) в диапазоне от 50% до 70% и хорошо подходят для длительной отдачи электроэнергии в периоды высокого спроса на неё. На основе изученной информации из источников [3–6] была составлена классификация систем хранения на сжатом воздухе (рисунок 1).



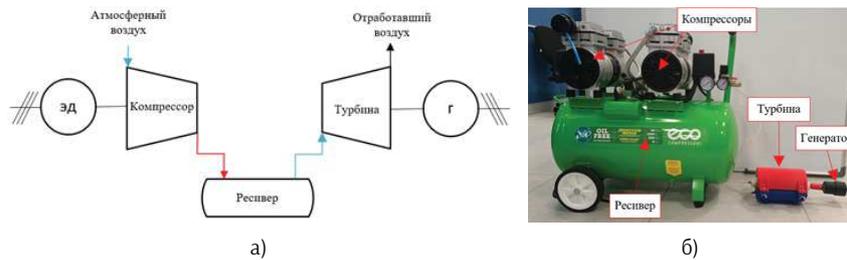
**Рисунок 1** – Классификация систем хранения на сжатом воздухе [3–6]

В рамках работы была смоделирована и создана методом 3D-печати экспериментальная модель воздушной турбины (рисунок 2), на базе которой проводились эксперименты и фиксировались следующие параметры: частота вращения, напряжение и сила тока.



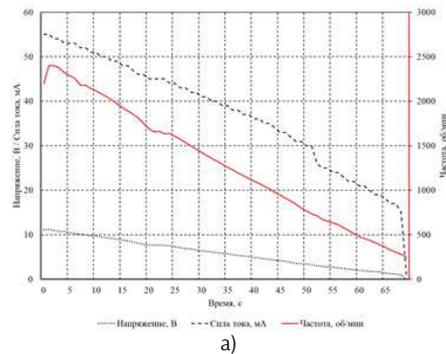
**Рисунок 2** – Экспериментальная модель воздушной турбины [Источник – собственная разработка автора]

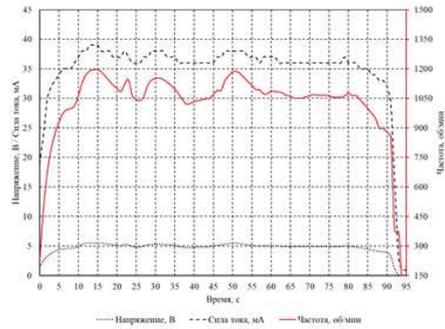
Для накопления воздуха использовался воздушный компрессор марки ECO AE-50-OF1. Схема установки и фотография исследуемого стенда представлены на рисунке 3 и относятся к диабатическому типу ВАС – тепло, получаемое в процессе сжатия воздуха, не аккумулируется, а отводится в окружающую среду. Подобные типы ВАС имеют КПД не более 55% [6].



**Рисунок 3** – Принципиальная схема (а) и фото испытательного стенда (б) диабатической ВАС: ЭД – электродвигатель; Г – генератор.  
[Источник – собственная разработка автора]

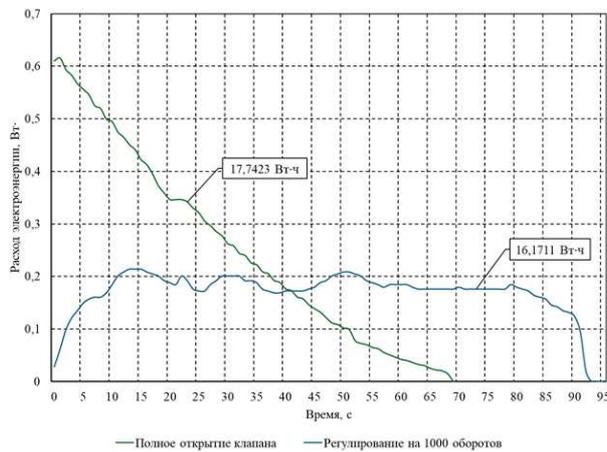
**Результаты и обсуждение.** В результате получены следующие данные: напряжение на генераторе напрямую зависит от частоты оборотов вала; при полном открытии клапана подачи воздуха на турбине и при попытке регулирования степени его открытия для изменения частоты оборотов выходные параметры значительно различались (рисунок 4). Попытка регулирования привела к снижению суммарной выработанной электроэнергии на 9%, однако сопровождалась увеличением длительности рабочего цикла системы приблизительно на 14 с (рисунок 5). Энергопотребление компрессора в процессе наполнения ресивера до избыточного давления 5 бар составило 30,97 Вт·ч.





б

**Рисунок 4** – Изменение показателей электрогенератора (частоты, силы тока и напряжения) при полном открытии клапана (а), и частичном регулировании (б)  
[Источник – собственная разработка автора]



**Рисунок 5** – Расход электроэнергии в зависимости от типа разряда ресивера  
[Источник – собственная разработка автора]

На основе полученных данных определён КПД разработанной установки, который составил 57,28% при полном открытии и 52,21 % при регулировании.

**Заключение.** Исследование, проведенное на экспериментальном стенде, позволило убедиться в довольно высоком КПД систем накопления с учетом полного рассеивания тепловой энергии при сжатии. Для повышения эффективности подобные системы хранения энергии необходимо сочетать с тепловыми накопителями или

с дополнительными теплоисточниками, работающие на местных видах топлива. Например, в Республике Беларусь необходимо рассмотреть использование дополнительного подогрева воздуха при сжигании древесных пеллет.

Внедрение ВАС станет полигоном для освоения компрессорных и турбинных технологий. Полученный опыт ляжет в основу реверс-инжиниринга, что позволит наладить ремонт и производство критически важных газовых турбин внутри страны, преодолев текущую импортозависимость.

#### *Список используемых источников*

1. О мерах по укреплению общественной безопасности и дисциплины: Директива Президента Республики Беларусь от 14 июня 2007 г. № 3 // Официальный интернет-портал Президента Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2007. – Режим доступа: <https://president.gov.by/ru/documents/direktiva-3-ot-14-ijunja-2007-g-1399>. – Дата доступа: 19.12.2025.
2. Об утверждении комплексного плана развития электроэнергетической сферы до 2025 года с учетом ввода Белорусской атомной электростанции и межотраслевого комплекса мер по увеличению потребления электроэнергии до 2030 года: постановление Совета Министров Республики Беларусь от 1 марта 2016 г. № 169 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа: <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C21600169>. – Дата доступа: 19.12.2025.
3. Государственное предприятие «Белорусская АЭС» [Электронный ресурс] : [сайт]. – Минск, 2010–2025. – Режим доступа: <https://belaes.by/ru/novosti.html>. – Дата доступа: 19.12.2025.
4. A review on compressed air energy storage: Basic principles, past milestones and recent developments / M. Budt [et al.] // Processes. – 2023. – Vol. 11, № 11. – P. 3061.
5. Status and Development Perspectives of the Compressed Air Energy Storage (CAES) Technologies—A Literature Review / M. Jankowski [et al.] // Energies. – 2024. – Vol. 17, № 9. – P. 2064.
6. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development / J. Wang [et al.] // Energies. – 2017. – Vol. 10, № 7. – P. 991.