

Повышение маневренности ядерных энергоблоков путем производства магнегаза во время снижения электропотребления

- **Дубковский В. А.**
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4955-7104>
- **Королёв А. В.**
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7898-8659>
- **Комарова Я. О.**
Одесский национальный политехнический университет, г. Одесса, Украина
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8885-7222>

Атомные электростанции (ЭС), успешно конкурирующие сегодня с другими видами генерации электроэнергии, уступают им по показателям маневренности, т. к. они изначально были спроектированы для работы в базовых режимах. Сегодня энергосистема Украины ставит задачу перед АЭС в обязательном участии в регулировании мощности.

В статье рассмотрены разные способы участия АЭС в регулировании мощности ЭС: получение синтез-газа с использованием теплоты ВТГР, различные способы маневрирования мощности реакторов ВВЭР-1000, использующих для аккумуляции теплоты эффекты абсорбции и десорбции аммиака в воде — схемы ВАРМ (водоаммиачный регулятор мощности); схемы дальнего теплоснабжения от АЭС — ВАТТ (водоаммиачный транспорт теплоты).

Выполнено расчетное сравнение эффективности различных схем маневрирования мощности ЭС и сопоставление их с магнегаз-технологией. Показано, что использование для целей покрытия пиковых нагрузок в современных энергосистемах с использованием установок магнегаз-технологии наиболее эффективно и целесообразно. КПД таких установок составил 42 %. Затраты на производство магнегаза для газотурбинной установки 3441483 грн, тогда, когда прибыль от продажи электроэнергии, произведенной на газотурбинной установке за счет сжигания магнегаза 498319110 грн.

Ключевые слова: энергосистема, пиковые нагрузки, магнегаз-технология, КПД, экономический эффект.

© Дубковский В. А., Королёв А. В., Комарова Я. О., 2019

По мере увеличения доли выработки электроэнергии на АЭС в общей выработке всех острей встает вопрос об участии АЭС в регулировании графика нагрузок Энергосистемы (ЭС). Учитывая, что проектирование и эксплуатация АЭС Украины проектировались под базовые режимы, переход на работу на переменных режимах в условиях ВВЭР реализуется медленно и достаточно напряженно. На сегодняшний день специальными экспериментами на ХАЭС подтверждена надежная работа ВВЭР-1000 в режиме изменения нагрузки в диапазоне 100–75–100 % [1].

Хотя результат экспериментов на ХАЭС является существенным прогрессом в освоении маневренных режимов работы АЭС с ВВЭР-1000, но энергетическая система ставит более жесткие требования к расширению диапазона маневрирования для АЭС. И пока требования ЭС не будут удовлетворены, использование маневренных генерирующих мощностей на органическом топливе неизбежно [2–4].

В этих условиях приобретает интерес разрабатываемые установки, производящие магнегаз за счет электроэнергии АЭС в период снижения энергопотребления [5–6].

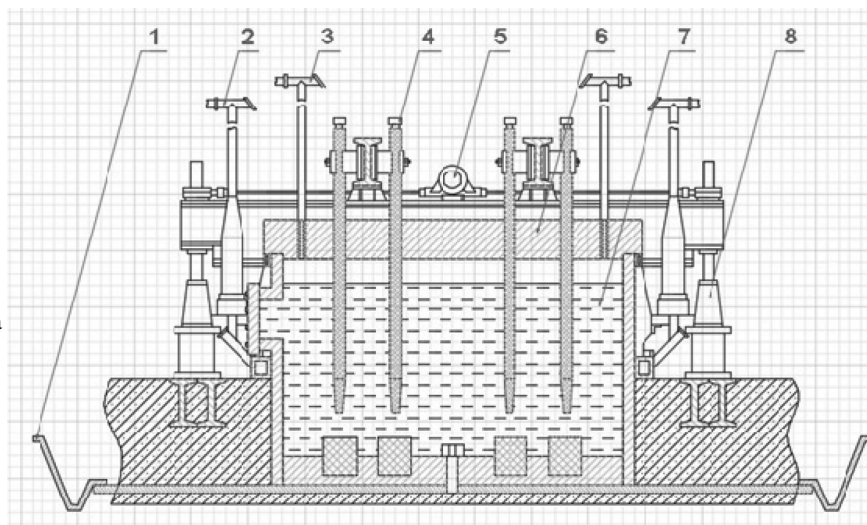


Рисунок 1 —
Полупромышленная установка
МГ с мощностью 100 МВт.
1 — шина подачи напряжения;
2 — подача рабочей смеси;
3 — подача газа в газгольдер;
4 — подвижный электрод;
5 — привод; 6 — крышка бака;
7 — бак с водой; 8 — опора

Краткие сведения о магнегаз-технологии

Впервые термин «магнегаз» появился в работах Р.М. Сантилли [7]. В 1978 г. при поддержке департамента энергетики США им были разработаны теоретические предпосылки получения магнегаза, а в 1998 г. построен реактор PlasmaArcFlow, реализующий его теоретические разработки [8–10]. Этот газ образуется в условиях интенсивных магнитных полей в электрической дуге, погруженной в воду. При этом происходит газификация углерода (графита) и конверсия воды и углерода в водород и оксид углерода.

На сегодняшний день магнегаз получил широкое применение как топливо для автомобилей, так и для использования в сварочных аппаратах и т. д. Основным преимуществом этого газа является низкое содержание CO_2 , что актуально для энергетического комплекса Украины.

Способ покрытия пиковых нагрузок в энергосистеме

Для регулирования мощности в энергосистеме предусматривается подключение промышленного аналога установки, после проведения пилотных экспериментов и накопления достаточного опыта ее эксплуатации. Были проведены репрезентативные исследования по получению магнегаза, результаты которых представлены в работах [11]. Установка по производству магнегаза выбирается с учетом безопасности и надежности работы в составе АЭС и не требует дополнительных особых условий. Была спроектирована реальная модель установки производства магнегаза (МГ) (рис. 1), основанная на базе установок для выплавки алюминия, которые подтвердили свою надежность и безопасность в эксплуатации на протяжении десятков лет [12].

Таблица 1 — Технические характеристики SGT-100

Топливо	природный газ/жидкое топливо/двухтопливная система; использование других типов топлива обсуждаемо
Частота	50 Гц
Электрический КПД	30,5 %
Тепловая мощность, q	11815 кДж/кВт*ч
Скорость вращения турбины	17384 об/мин

Весь наработанный во время снижения энергопотребления магнегаз сжигается в газотурбинной установке компании Siemens SGT-100 и производит электричество в пиковое время суток. Технические характеристики SGT-100 представлены в табл. 1 [13].

Получение синтез-газа, аналогичного по составу с магнегазом, в энерготехнологических установках с атомным источником тепла

В работах [14–16] приведены результаты исследований атомных энерготехнологических установок с высокотемпературными газоохлаждаемыми реакторами (ВТГР), в которых за счет высокопотенциальной части теплоты теплоносителя — 1100–1400 К осуществлялась паровая каталитическая конверсия природного газа либо газификации твердого топлива (низкосортных марок углей) с получением синтез-газа, аналогичного по составу с магнегазом. Исследования были направлены на внедрение ядерных источников энергии как в химическую и металлургическую промышленность, так и для создания атомных станций дальнего теплоснабжения на базе хмотермических систем передачи и аккумулирования тепловой энергии, а также комплексов производства жидких и газообразных синтетических топлив (магнегаз) из угля.

Внедрение высокотемпературных ядерных реакторов в эти технологии позволяло на 30–50 % снизить расход органического сырья — природного газа и угля за счет использования ядерной энергии. При этом термодинамическая эффективность энерготехнологических установок с ВТГР оказывалась существенно выше чисто энергетических установок с такими же начальными

параметрами. Термодинамический коэффициент эффективности в технологической части установки достигал значений 0,9–0,92, а в целом для установки — 0,56–0,58 [14, 17].

В работах [15, 16, 18, 19] были разработаны схемы маневренных АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000, использующих для аккумулирования теплоты эффекты абсорбции и десорбции аммиака в воде — схемы ВАРМ, а также схемы дальнего теплоснабжения от АЭС — ВАТТ. Схема ВАРМ позволяла в пике нагрузки повышать мощность блока на 15 %, однако КПД схемы составлял 13–14 %.

В данной работе проведено технико-экономическое сравнение предлагаемой технологии получения магнегаза, энерготехнологических установок с ВТГР и хмотермических водоаммиачных систем ВАРМ и ВАТТ.

Для сравнения эффективности использования системы магнегаз-технология был проведен расчет КПД данной установки, который определялся по выражению:

$$\eta_{\text{мг}} = \frac{Q_{\text{р мг}}^{\text{H}}}{Q_{\text{р С}}^{\text{H}} + N_{\text{э}}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{р мг}}^{\text{H}}$ — удельная теплота сгорания магнегаза, кДж/кг; $Q_{\text{р С}}^{\text{H}}$ — удельная теплота сгорания углерода, кДж/кг; $N_{\text{э}}$ — электрическая мощность установки, кВт.

$Q_{\text{р мг}}^{\text{H}}$ рассчитывается по формуле Д. И. Менделеева:

$$Q_{\text{р мг}}^{\text{H}} = 339,3 \cdot C + 1256 \cdot H - 109 \cdot (O - S) - 25,2 \cdot (9 \cdot H + W), \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

где C — процентное содержание углерода; H — процентное содержание водорода; O — процентное содержание кислорода; S — процентное содержание серы; W — процентное содержание влаги.

Таблица 2 — Сравнительная оценка энергетических показателей систем

Удельная теплота сгорания магнегаза, кДж/кг	12614
КПД системы магнегаз-технологии $\eta_{\text{мг}}$, %	42
КПД газификации твердого топлива на реакторах типа ВТГР $\eta_{\text{г втгр}}$, %	92
КПД системы абсорбции и десорбции аммиака, $\eta_{\text{А}}$, %	13

Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что наиболее эффективный способ покрытия пиковых нагрузок является система газификации твердого топлива на реакторах типа ВТГР. Но согласно энергетической стратегии Украины на 2035 год [2] не планируется строительство АЭС с таким типом реактора.

Экономическое обоснование использования системы магнегаз-технологии

В ранних работах по исследованию магнегаза было представлено, объем получения магнегаза за год на полупромышленной установке МГ с электрической мощностью 100 МВт составляет 68117760 м³ [3]. Цена на производство электроэнергии в дневной и ночной периоды будет определяются следующим образом:

$$C_d = \frac{K_d \times C_{э/э}}{\eta_{MG}}, \quad (3)$$

$$C_n = \frac{K_n \times C_{э/э}}{\eta_{MG}}, \quad (4)$$

где K_d , K_n — тарифные коэффициенты дневного и ночного период;

$C_{э/э}$ — цена на электроэнергию, грн; η_{MG} — КПД установки.

Затраты на производство магнегаза для газотурбинной установки:

$$Z_n = C_n \times N_э \times \tau, \quad (5)$$

где $N_э$ — электрическая мощность установки, кВт; τ — время работы установки, час.

Для расчета дохода, получаемого при сжигании магнегаза на газотурбинной установке, определяем количество производимой электроэнергии в год.

$$E = V_{MG} \times Q_n^p \times \frac{1}{q}, \quad (6)$$

где V_{MG} — объем магнегаза за год, м³; Q_n^p — теплота сгорания магнегаза, кДж/м³; q — тепловая мощность газотурбинной установки, кДж/кВт*час.

Определим доход от продажи электроэнергии вырабатываемой на газотурбинной установке:

$$D = E \times C_{э/э}^H, \quad (7)$$

где $C_{э/э}^H$ — тариф электроэнергии для населения Украины, грн.

Зная затраты, которые идут на производство магнегаза, в ночное время суток и зная доход от продажи электроэнергии населению можно определить чистую прибыль от продажи электроэнергии произведенной на газотурбинной установке за счет сжигания магнегаза.

$$P = D - Z_n. \quad (8)$$

Результаты экономических расчетов представлены в табл. 3

Таблица 3 — Экономические показатели расчетов системы магнегаз-технологии

Цена на производство электроэнергии в дневной период C_d , грн	1,51
Цена на производство электроэнергии в ночной период C_n , грн	0,39
Затраты на производство магнегаза для газотурбинной установки Z_n , грн	3441483
Количество производимой электроэнергии в год E , кВт*час	298667020
Доход от продажи электроэнергии, вырабатываемой на газотурбинной установке D , грн	501760594
Прибыль от продажи электроэнергии, произведенной на газотурбинной установке за счет сжигания магнегаза, грн	498319110

Выводы

1. Ранее в Украине проводились исследования и разработки систем покрытия пиковых нагрузок в энергосистеме. Но, несмотря на высокий КПД системы газификации угля — 92 % в установках с ВТГР, их внедрение в энергосистему Украины невозможно из-за отсутствия АЭС с реакторами этого типа.

2. Использование системы абсорбции и десорбции аммиака на реакторных установках ВВЭР-1000 нецелесообразно из-за низкого КПД, который составляет — 13 %.

3. Оптимальным вариантом для внедрения новых систем покрытия пиковых нагрузок в энергосистеме Украины является система с использованием магнегаз-технологии. КПД таких установок составляет 42 %.

4. Расчетный экономический эффект от внедрения таких систем составил 498,3 млн. грн в год, что в разы превышает затраты на производство магнегаза в ночное время суток.

Список использованной литературы

1. Шавлаков А. Проблемы формирования прогнозного баланса электроэнергии. Энергоатом Украины. 2016. Вып.1 (42).

2. Энергетична стратегія України на період до 2035 року. 2018.— Режим доступа: http://mpre.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.

3. IAEA-TECDOC-861 Review of design approaches of advanced pressurized LWRs. IAEA Vienna. 1996.

4. Filimonov P., Krainov Y., Proselkov V. Status and Prospects of Activities on Algorithms and Methods in VVER-1000 Core Control. VVER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. *Proceedings of an international seminar*. St. Constantine. Varna. Bulgaria. 7–11 November 1994.

5. Королёв А. В., Комарова-Ракова Я. О. Исследование возможности получения «магнегаза» из водно-угольной смеси. Ядерная энергетика та докiлля. 2016. № 2(8). С. 64–65.

6. Комарова-Ракова Я. О. Получение магнегаза в отработанных угольных шахтах и использование его в пиковых нагрузках энергосистемы.

Ядерная энергетика та докiлля. 2018. № 1(11). С. 69–71.

7. Santilli R. M., Aringazin A. K. A study of the energy efficiency of hadronic reactor of molecular type. 2001. — Режим доступа: www.usemag-negas.com

8. Santilli R. M., Aringazin A. K. Structure and combustion of magnegas™. 2001. — Режим доступа: www.usemagnegas.com.

9. Santilli R.M.. Foundations of Hadronic Chemistry With Applications to New Clean Energies and Fuels. Kluwer Academic Publishers. Boston-Dordrecht-London. 2001. 431 p.

10. Ruggero Maria Santilli. The Novel Magnecular Species of Hydrogen and Oxygen with Increased Specific Weight and Energy Content. Preprint Institute for Basic Research IBR-TC-033. December 29, 2001. *The International Journal of Hydrogen Energy*. Pergamon Press. Oxford. England.

11. Nosulenko V.I., Mescheryakov G.N. Patent 1570197 GB, B23P1/16. Method of electro-erosion machining of metals. 12.07.77.

12. Болотов А. В., Шепель Г. А. Электротехнологические установки. Москва: Высшая школа. 1998. С. 246–248.

13. SGT-100 industrial gas turbine. — Режим доступа: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-100.html>.

14. Дубковский В.А. Рациональные процессы, циклы и схемы энергоустановок. Одесса. Наука и техника. 2003. 224 с.

15. Гохштейн Д. П., Лапшов В. Н., Дубковский В. А. Критерии термодинамической эффективности атомных энерготехнологических установок. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Атомно-водородная энергетика и технология. Вып.2 (7).1980. С. 31–33.

16. Гохштейн Д. П., Лапшов В. Н., Дубковский В. А. Определение комплексов оптимальных параметров АЭТУ с газификацией твёрдого топлива, предназначенных для производства различной продукции. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: АЭИТ. № 1 (14), 1983. С. 75–77.

17. Дубковский В. А. и др. Термодинамический анализ абсорбционных систем передачи теплоты. Известия ВУЗов «Энергетика», № 9. 1991. С. 41–45.

18. Дубковский В. А. Преобразование и аккумуляция энергии термодинамическими методами. Труды Одес. Политехнич. ун-та. № 1(5), 1998. С. 275–277.

19. Погосов О.Ю., Дерев'янку О.В. Додаткові технічні можливості для удосконалення систем безпеки АЕС і зниження ризику негативного впливу об'єктів ядерної енергетики на довкілля. Ядерная энергетика та докiлля. № 1(7), 2016. С.13–16.

References

1. Shavlakov, A. (2016). Problems of Formation of the Forecast Balance of Electricity. *Energatom of Ukraine*, 1 (42).
2. Energy Strategy of Ukraine until 2035. (2018). Retrieved from http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/publish/article?art_id=245239564.
3. IAEA. (1996). IAEA-TECDOC-861. *Review of Design Approaches of Advanced Pressurized LWRs*, Vienna.
4. Filimonov, P., Krainov, Y., Proselkov, V. (1994, November 7–11). Status and Prospects of Activities on Algorithms and Methods in VVER-1000 Core Control. VVER Reactor Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. *Proceedings of an international seminar*, St. Constantine, Varna, Bulgaria.
5. Korolev, A.V., Komarova-Rakova, Ya. O. (2016). Investigation of the Possibility of Obtaining “Magnegas” from a Water-Coal Mixture. *Nuclear Power and the Environment*. 2(8). pp. 64–65.
6. Komarova-Rakova, Ya. O. Obtaining Magnegas in Spent Coal Mines and Its Use in Peak Loads of the Power System. *Nuclear Power and the Environment*. 2016. Edition 1(11), 69–71.
7. Santilli, R. M., Aringazin, A. K. (2001). *A STUDY OF THE ENERGY EFFICIENCY OF HADRONIC REACTOR OF MOLEKULAR TYPE*. Retrieved from www.usemagnegas.com.
8. Santilli, R. M., Aringazin, A. K. (2001). *STRUCTURE AND COMBUSTION OF MAGNEGASES™*. Retrieved from www.usemagnegas.com.
9. Santilli, R.M. (2001). *Foundations of Hadronic Chemistry with Applications to New Clean Energies and Fuels*. Kluwer Academic Publishers. Boston-Dordrecht-London, 431.
10. Santilli, R. M. (2001, December 29). The Novel Magnecular Species of Hydrogen and Oxygen with Increased Specific Weight and Energy Content. Preprint Institute for Basic Research IBR-TC-033, *International Journal of Hydrogen Energy*, Pergamon Press, Oxford, England.
11. Nosulenko, V.I., Mescheryakov, G.N. (1977, July 12). Patent 1570197 GB, B23P1/16. *Method of Electro-Erosion Machining of Metals*.
12. Bolotov, A.V., Shepel, G.A. (1998). *Electro-technological Installations*. Moscow. High school. pp. 246–248.
13. SGT-100 Industrial Gas Turbine. Retrieved from <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-100.html>.
14. Dubkovskiy, V.A. (2003). Rational Processes, Cycles and Schemes of Power Plants. Science and Technology, Odessa, 224.
15. Gokhshtein, D.P., Lapshov, V.N., Dubkovskiy, V.A. (1980). Criteria for the Thermodynamic Efficiency of Atomic Energy Technology Plants. *Questions of Atomic Science and Technology: Hydrogen Atomic Energy and Technology*, 2 (7), pp. 31–33.
16. Gokhshtein, D.P., Lapshov, V.N., Dubkovskiy V.A. (1983). Determination of Complexes of Optimal Parameters of AETU with Gasification of Solid Fuel intended for the Production of Various Products. *Questions of Atomic Science and Technology: AVEiT*, 1 (14), pp. 75–77.
17. Dubkovskiy, V.A. et al. (1991). Thermodynamic Analysis of Absorption Heat Transfer Systems. *University News “Energy”*, 9, pp. 41–45.
18. Dubkovskiy V.A. (1998). Transformation and energy storage by thermochemical methods. *Proceedings of Odessa Polytechnic University*, 1(5), pp. 275–277.
19. Pogosov, O.Yu. Additional Technical Possibilities for Improvement of NPP Safety Systems and Reduction of the Risk of Negative Impact of Nuclear Facilities on the Environment/Pogosov, O.Yu., Derevianko, O.V. (2016). *Nuclear Power and the Environment*, 1 (7), pp. 13–16.

Підвищення маневреності ядерних енергоблоків шляхом виробництва магнегазу під час зниження електроспоживання

Дубковський В. О., Корольов О. В., Комарова Я. О.
Одеський національний політехнічний університет,
м. Одеса, Україна

Атомні електростанції, що успішно конкурують сьогодні з іншими видами генерації електроенергії, поступаються їм за показниками маневреності, оскільки вони спочатку були спроектовані для роботи у базових режимах. Сьогодні енергосистема України ставить завдання перед АЕС про обов'язкову участь в регулюванні потужності.

У статті розглянуті різні способи участі АЕС в регулюванні потужності енергосистеми: отримання синтез-газу з використанням теплоти ВТГР, різні способи маневрування потужності реакторів ВВЕР — 1000, що використовують для акумуляції теплоти ефекти абсорбції і десорбції аміаку у воді — схеми ВАРМ; схеми далекого теплостачання від АЕС — БАТТ (водоаміачний транспорт теплоти).

Виконано розрахункове порівняння ефективності різних схем маневрування потужності ЕС і зіставлення їх з магнегаз-технологією. Показано, що використання для цілей покриття пікових навантажень в сучасних енергосистемах з використанням установок магнегаз-технології найефективніше і доцільно. ККД таких установок склав 42 %. Витрати на виробництво магнегазу для газотурбінної установки 3441483 грн, тоді, коли прибутки від продажу електроенергії за рахунок спалювання магнегазу в газотурбінній установці 498319110 грн.

Ключові слова: енергосистема, пікові навантаження, магнегаз-технологія, ККД, економічний ефект.

Increase of Maneuverability of Nuclear Power Units by Production of Magnegas during Decrease of Electric Power Consumption

Dubkoskyi V. A., Koroliiov A. V., Komarova Y. O.
Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine

Nuclear power plants that compete successfully today with other types of electric power generation are inferior to them regarding maneuverability, since they were originally designed for operation in basic modes. Today, the energy system of Ukraine sets the task for NPP on obligatory participation in power regulation.

The article considers different ways of NPP participation in power regulation of the energy system: obtaining synthesis gas using heat of HTGR, different power maneuvering methods of VVER-1000 that use the effects of ammonia absorption and desorption in water for heat accumulation: WAPC (water-ammonia power controller) diagrams; diagrams of distant power supply from NPP: WAHT (water-ammonia heat transport).

Design comparison of the efficiency of different ES power maneuvering diagrams and their comparison with

the magnegas technology was performed. It was shown that the use of magnegas technology installations to cover peak loads in present energy systems is the most efficient and reasonable. The efficiency factor of such installations is 42 %. The cost of magnegas production for a gas turbine installation is 3441483 UAH, while the profit on the sale of electricity generated at a gas turbine installation due to magnegas burning is 498319110 UAH.

Keywords: energy system, peak loads, magnegas technology, efficiency factor, economic effect.

Отримано 15.07.2019