



## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА СЖАТОГО ВОЗДУХА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВОЗДУШНО-АККУМУЛИРУЮЩЕЙ СТАНЦИИ

В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Старикова

Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск,  
Россия

ORCID\*: <http://orcid.org/0000-0002-2649-5318>, [Natalia-starikova@yandex.ru](mailto:Natalia-starikova@yandex.ru)

**Резюме:** Статья посвящена термодинамическому анализу процессов, происходящих в накопителях энергии сжатого атмосферного воздуха. В качестве инструмента для исследования процессов сжатия-расширения предлагается метод составления и анализа эксергетического баланса. В результате могут быть оценены основные показатели – потенциал сжатого воздуха и эффективность всех элементов схемы и воздушно-аккумулирующей станции (ВАЭС) в целом. Процедура исследования показана на примере адиабатической ВАЭС. Рассчитаны зависимости конечной температуры, удельной эксергии и работы сжатия на 1 тыс. м<sup>3</sup> атмосферного воздуха от степени его сжатия. ВАЭС такого типа по объективным причинам не может иметь высокую термодинамическую эффективность. Однако она обладает рядом экономических преимуществ, а также и хорошо совместима с возобновляемыми источниками энергии, например, с ветроэнергетическими установками. Для повышения КПД процесса необходимо преобразовать тип ВАЭС в неадиабатический, что потребует изменения схемы и режима работы ее элементов. При этом сжатие в компрессоре должно производиться с максимально возможным отводом тепла, а процесс расширения в ГТУ открытого типа должен осуществляться с подводом тепла.

**Ключевые слова:** накопители энергии, воздушно-аккумулирующие электростанции, термодинамические исследования, эксергетический метод.

## EVALUATION THE ENERGY POTENTIAL OF COMPRESSED AIR FOR DETERMINING EFFICIENCY OF AIR-ACCUMULATING ELECTRIC

V.S. Stepanov, T.B. Stepanova, N.V. Starikova

Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2649-5318>, [Natalia-starikova@yandex.ru](mailto:Natalia-starikova@yandex.ru)

**Abstract:** The thermodynamics analysis of processes flowing into the storages of compressed air energy are considered in the paper. The exergy balance has been propose as the instrument for study. The main indices have been estimate: the compressed air potential, efficiencies for all elements of the scheme and air-accumulating electric station (AAES) as a whole. The study procedure demonstrated on the example of adiabatic AAES. The relation of final temperatures, specific exergy and compression work per 1000 m<sup>3</sup> of atmospheric air to compression ratio are determined. On the base, it can concluded that adiabatic AAES has not high efficiency, but it has some advantages: simple scheme, low investment, and combined well with renewable energy sources, for instance, wind-driven plants. To raise the efficiency of an adiabatic AAES, it should

be transform to diabatic type. For that it is required modify the scheme and work regime of its elements, and combined it in complex with gas turbine plants.

**Keywords:** energy storages, air accumulating electric station, thermodynamics analysis, exergy method

**For citation:** Stepanov V.S., Stepanova T.B., Starikova N.V. Evaluation the energy potential of compressed air for determining efficiency of air-accumulating electric. *Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS*. 2019; 21 (3-4):27-37. (In Russ). doi:10.30724/1998-9903-2019-21-3-4-27-37.

## Введение

В последние годы во многих странах существенно возрос интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ), использование которых не нарушает естественный баланс энергии нашей планеты. К возобновляемым источникам энергии относят запасы, которые восполняются естественным образом и в обозримой перспективе являются практически неисчерпаемыми. В первую очередь к ним относятся солнечная радиация, энергия ветра, энергия рек и др. [1–3].

Однако практически все источники возобновляемой энергии, как и подобает естественным процессам, имеют вероятностный режим выдачи энергии в течение суток, времени года, периода времени. Причем режим выдачи этой энергии не совпадает, а часто является противоположным требованиям энергосистемы с точки зрения покрытия графика нагрузки потребителей. То есть эти источники не обладают постоянством выдаваемой мощности, не подлежат регулированию, не могут подстроиться к режиму энергопотребления энергосистемы. Иначе говоря, использование ВИЭ сопряжено с целым рядом трудностей, обусловленных вероятностным характером выдачи и, следовательно, сложностью их встраивания в режим работы традиционных энергосистем.

В настоящее время активно продвигается новая концепция – строительство интеллектуальных энергосистем будущего, получившая название *Smart Grid*. Эта концепция предусматривает достижение таких важных целей: широкое использование современных средств контроля и управления, включая интернет-технологии, интеграцию в энергосистему источников, работающих на возобновляемых энергоресурсах, а также разного рода накопителей энергии, чтобы повысить надежность и экономичность производства электроэнергии и ее качество.

Известно, что аккумуляция энергии можно осуществлять в виде потенциальной энергии того или иного агента (энергоносителя), например: воды, используя её на гидроаккумулирующих станциях (ГАЭС), либо сжатого газа (воздуха), подавая его в бескомпрессорные газовые турбины, установленные на воздушно-аккумулирующих электростанциях (ВАЭС) различного типа.

Накапливать энергию сжатого воздуха можно путём закачивания его компрессором высокого давления в специально созданные резервуары или подземные естественные и искусственные емкости. По мере надобности сжатый воздух из хранилища подается в соответствующий элемент ВАЭС.

Существует два типа накопителей сжатого воздуха, которые отличаются разным расположением хранилища. Первый из них называется *системой наземного хранения*, а другой – *подземного хранения*. Каждый из них имеет свои специфические требования и сферу применения. В настоящее время подземные резервуары сжатого воздуха экономически целесообразно применять в составе воздушно-аккумулирующих электростанций мощностью от 100 кВт и более, а наземные хранилища могут работать в составе небольших электростанций мощностью от 10 до 100 кВт.

В качестве наземных накопителей сжатого воздуха могут быть использованы трубопроводы природного газа, по тем или иным причинам оказавшиеся незадействованными. В составе ВАЭС небольшой мощности могут использоваться специально построенные резервуары для хранения сжатого воздуха.

Более экономичными являются подземные хранилища сжатого воздуха, в качестве которых целесообразно использовать естественные пустоты в земной коре, соляные пещеры, отработанные месторождения природного газа и т. д.

Накопители энергии сжатого воздуха (НЭСВ) позволяют сохранять большие количества (объёмы) энергии на продолжительное время при относительно низкой стоимости. Поэтому их широкое использование в интеллектуальных энергосистемах будущего (*Smart Grid*) имеет весьма хорошие перспективы с учетом дальнейшего повышения энергетической эффективности самих накопителей.

Совершенствование процессов сжатия и расширения воздуха для повышения КПД НЭСВ возможно лишь в том случае, когда имеется представление о тех сложных процессах, которые протекают в компрессорах, и известен характер изменения параметров воздуха и энергетических преобразований в других элементах ВАЭС [1].

#### **Термодинамические основы исследования процессов сжатия-расширения воздуха [4, 5]**

Для описания характера изменения параметров воздуха в таком процессе используется термодинамическая функция политропы  $pV^n = \text{idem}$  с разными значениями её показателя  $n$ .

Всё многообразие процессов сжатия и расширения воздуха принято подразделять на два типа. Процессы, осуществляемые без обмена теплотой сжимаемого/расширяющегося агента с окружающей средой, т. е. при  $dq = 0$  и  $dS = 0$ , называются *адиабатическими* или *изоэнтропными*. Показатель политропы таких процессов  $n = k$ , где  $k$  – показатель адиабаты, равный отношению изобарной  $C_p$  и изохорной  $C_v$  теплоемкостей воздуха,

$k = \frac{C_p}{C_v}$ . Все другие процессы, протекающие с обменом теплотой, называют *неадиабатическими* или *диабатическими*\*.

Процессы сжатия воздуха могут осуществляться с отводом теплоты от сжимаемого агента, показатель политропы для них  $n < k$ . При этом если процесс сжатия газа происходит с полным отводом теплоты, т. е. процесс протекает при постоянной начальной температуре  $T_1 = \text{idem}$ , то он называется *изотермическим*. Показатель политропы таких процессов  $n = 1$ .

В общем случае для неадиабатических процессов сжатия воздуха, осуществляемых с отводом теплоты, показатель политропы  $n < k$ , а при подводе теплоты –  $n > k$ . Значения показателя политропы для неадиабатических процессов расширения при подводе тепла  $n < k$ , а при отводе тепла –  $n > k$ .

На рис. 1 показана зависимость параметров состояния агента в идеальном компрессоре от значения показателя политропы, описывающая разные процессы сжатия воздуха. Диаграмма отображает процесс сжатия воздуха в поршневом компрессоре, имеющем идеальные клапаны, без мёртвого пространства. Работа, затрачиваемая компрессором за один цикл, равна площади под кривой, описываемой политропой с соответствующим показателем  $n$ .

Как видно на рис. 1, эта работа имеет минимальное значение при осуществлении процесса сжатия воздуха с полным отводом от него выделяемого тепла, т. е. по изотерме с показателем политропы  $n = 1$  (площадь 1-2-3-4-1). Реализовать такой процесс практически невозможно.

---

\* В отечественной литературе этот термин обычно не применяется.

Также невозможно реализовать процесс сжатия по адиабате с показателем политропы  $n = k$ , поскольку не представляется возможным создать компрессор, в котором бы отсутствовал теплообмен между сжимаемым агентом и окружающей средой. Работа адиабатического сжатия воздуха (площадь  $1-2'-3-4-1$ ) больше работы изотермического сжатия.

Реально осуществимые процессы сжатия воздуха являются неадиабатическими (диабатическими) с показателями политропы из областей  $1 < n < k$  и  $n > k$ . Поэтому неудивительно, что адиабатический процесс сжатия/расширения газа принимается за эталонный, а характеристики сжимаемого агента используются как предельные.

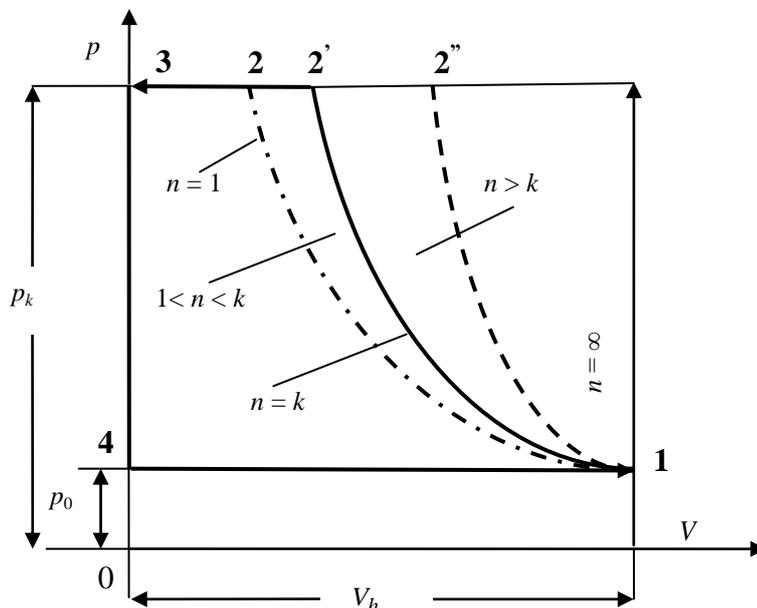


Рис. 1. Диаграмма процессов сжатия воздуха в  $p$ - $V$  координатах

Рассмотрим диаграмму процессов идеального компрессора, показанную на рис. 1. Процесс всасывания воздуха  $1-4$  происходит при постоянном давлении  $p_0 = \text{idem}$ . Процесс сжатия осуществляется по обратимой адиабате  $1-2$ , описываемой уравнением  $pV^k = \text{idem}$ . Процесс выталкивания воздуха  $2-3$  происходит при постоянном давлении  $p_k = \text{idem}$ . Работа, затрачиваемая компрессором за цикл, равна площади  $1-2-3-4-1$ . Она характеризует термомеханическую эксергию сжатого воздуха и может быть определена по формуле

$$l = e_{\text{TM}} = \int_1^2 V dp, \quad (1)$$

где  $V$  – объём цилиндра;  $dp$  – бесконечно малое изменение давления.

Из уравнения адиабаты  $p_1 V_1^k = p V^k$  следует:

$$V^k = V_1 \frac{p_1^{1/k}}{p^{1/k}}. \quad (2)$$

В результате подстановки и интегрирования получим выражение для определения работы адиабатического сжатия воздуха:

$$l = e_{\text{тм}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (3)$$

Таким образом, в системах накопления и использования сжатый воздух постоянно подвергается процессам сжатия и расширения. Однако о том, какие энергетические преобразования происходят при этом с воздухом, как меняется его энергетический потенциал, как оценить этот потенциал, – в среде специалистов нет единого мнения в использовании понятий энергия или эксергия. В данной статье используются понятия эксергия, эксергетический баланс [6–9].

Уравнение энергетического и эксергетического балансов обратимых процессов сжатия и расширения для единицы массы любого газа имеют вид:

$$l = h_2 - h_1 + q \quad (4)$$

и

$$l = e_2 - e_1 + e_q = e_2 - e_1 + q \cdot \tau_e. \quad (5)$$

Здесь  $\tau_e = \frac{T - T_0}{T}$  – коэффициент работоспособности теплоты, где  $T$  – произвольная температура;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Процессы могут проводиться при разном соотношении температур  $T$  и  $T_0$ . Интерес представляет случай сжатия при  $T = T_0$ , когда  $e_q = 0$ . В этом случае  $l = e_2 - e_1$ , т. е. работа изотермического сжатия (расширения) при температуре окружающей среды равна разности значений эксергии газа в начальном и конечном состояниях.

Из уравнения (4) следует, что изменение энергии газа (в поточном процессе энергия газа измеряется энтальпией) равно разности между затраченной работой  $l$  и отведённым теплом  $q$ :

$$h_2 - h_1 = l - q. \quad (6)$$

Для идеального газа эта величина равна нулю, поскольку его эксергия не зависит от давления, и отведённое в процессе сжатия тепло  $q$  в точности равно затраченной работе  $l$ .

В общем случае для реального газа величина  $q \neq l$ , и значение разности  $h_2 - h_1$  определяется величиной и знаком изотермического эффекта Джоуля-Томсона рассматриваемого газа  $\Delta h_T$  при данной температуре, т. е.

$$\Delta h_T = h_1 - h_2. \quad (7)$$

Величина и знак эффекта Джоуля-Томсона определяется соотношением между работой газа и работой сил внешнего давления, а также свойствами самого газа, в частности размером его молекул и их взаимодействием.

Для таких газов, как воздух, кислород, азот при  $T_0$  и давлениях до 30 МПа величины  $\Delta h_T$  больше нуля (положительный эффект Джоуля-Томсона) и, следовательно, энергия таких сжатых газов меньше, чем несжатых ( $h_2 < h_1$ ).

Для других газов (гелий, неон, водород) при  $T_0$   $\Delta h_T < 0$  (отрицательный эффект Джоуля-Томсона), и энергия сжатого газа на несколько процентов больше, чем расширенного. Однако эта разница очень мала по сравнению с величиной работы, затрачиваемой на сжатие газа.

Таким образом, величина энергии сжатого газа незначительно отличается от энергии несжатого газа, и в большинстве случаев меньше её.

В тех случаях, когда изотермическое сжатие происходит при  $T \neq T_0$ , величина  $e_q$  в уравнении (4) не равна нулю.

Энергетический баланс процесса сжатия в общем случае можно записать так:

$$l = q - \Delta h_T, \quad (8)$$

а эксергетический баланс –

$$l = e_2 - e_1 + e_q = \Delta e + q \cdot \tau_e . \quad (9)$$

Подставляя значение  $q$  из уравнения (8) в уравнение (9) и раскрывая значение  $\tau_e$ , можно получить:

$$l = \Delta e \frac{T}{T_0} + \Delta h_T \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0} - \Delta h_T \quad (10)$$

и

$$q = (\Delta e + \Delta h_T) \frac{T}{T_0} . \quad (11)$$

Для идеального газа величина изотермического эффекта Джоуля-Томсона  $\Delta h_T = 0$ . В этом случае выражения (10) и (11) сводятся к следующей формуле:

$$l = q = \Delta e \frac{T}{T_0} . \quad (12)$$

Для того чтобы оценить величину энергетического потенциала сжатого воздуха при разных его давлениях, нами были выполнены расчёты значений термомеханической эксергии 1000 м<sup>3</sup> атмосферного воздуха для соответствующих давлений. В расчётах принималось, что эксергия воздуха равна работе его адиабатического сжатия в идеальном компрессоре, которая вычислялась по выражению (3).

Результаты расчётов для диапазонов давлений от 3 до 90 атм приведены в табл. 1. Полученную зависимость можно использовать при решении ряда конкретных задач, например: для оптимизации состава виртуальных электростанций с применением энергии накопителей сжатого воздуха или при выборе состава генерирующих источников автономных энергосистем и оптимизации режимов их работы с учётом неравномерности графика нагрузки в рассматриваемой системе.

Кроме того, значения термомеханической эксергии сжатого воздуха позволяют определить энергетический потенциал воздуха, поступающего в хранилище, при известных значениях давления  $p_1$  и  $p_2$ . Для известного объёма  $V$  он может быть найден как разница величин эксергии при соответствующих давлениях, т. е.

$$\Pi_\phi = (e_2 - e_1) \cdot V . \quad (13)$$

Очевидно, что потенциал того же объёма воздуха, поступающего из хранилища в газовую турбину, будет таким же. Например, если при подаче компрессором 100 тыс. м<sup>3</sup> воздуха давление в хранилище изменилось с 80 до 90 атм, то энергетический потенциал этого объёма воздуха составит

$$\Pi_\phi = (257,80 - 245,98) 100 = 1182 \text{ кВт} \cdot \text{ч} .$$

Поскольку энергетический потенциал сжатого воздуха – это есть работа сжатия, то, зная эту величину, можно определить количество электрической энергии, затраченной на привод компрессора при сжатии им воздуха заданного объёма. Это значение можно найти по выражению

$$W_{\text{эл}}^{\text{к}} = \frac{\Pi_\phi}{\eta_{\text{к}} \cdot \eta_{\text{эд}}} , \quad (14)$$

где  $\eta_{\text{к}}$  – КПД компрессора;  $\eta_{\text{эд}}$  – КПД электродвигателя.

Аналогично можно определить величину электрической энергии, которую можно получить с помощью газотурбинного блока:

$$W_{\text{эл}}^{\text{к}} = \Pi_\phi \cdot \eta_{\text{ГТ}} \cdot \eta_{\text{ЭГ}} ,$$

где  $\eta_{гт}$  – КПД газовой турбины;  $\eta_{эг}$  – КПД электрического генератора.

Полученные величины термомеханической эксергии воздуха можно использовать для оценки энергетического потенциала сжатого воздуха накопителей, применяемых в различных схемах и при различных режимах работы ВАЭС.

### Принципиальные схемы и оборудование ВАЭС

Как было отмечено выше, во время фазы сжатия выделяется тепло, т. е. сжатый воздух нагревается. Чем выше степень повышения давления воздуха  $\beta$ , тем выше его конечная температура  $T_k$ :

$$T_k = T_0 \left[ \beta^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (15)$$

В зависимости от использования тепла, выделяемого при сжатии воздуха, различают две типовые схемы ВАЭС – адиабатическую и неадиабатическую. Рассмотрим особенности построения адиабатической ВАЭС, схема которой показана на рис. 2.

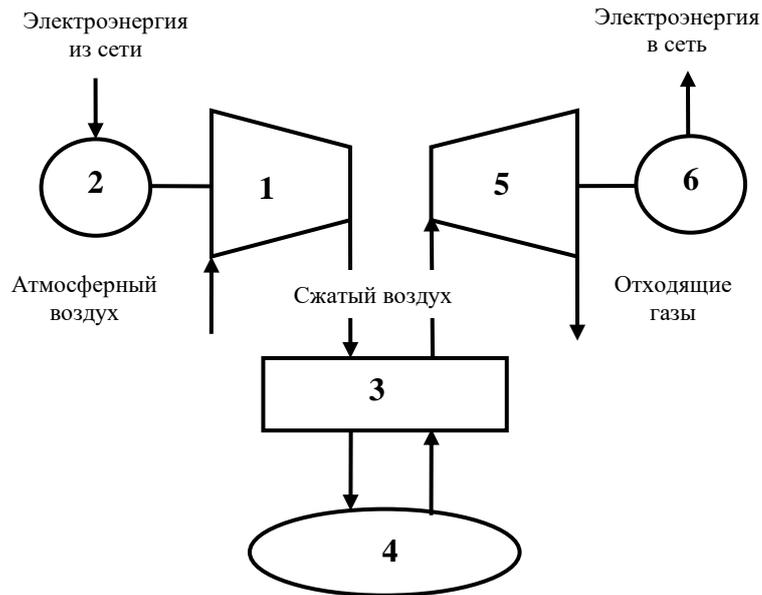


Рис. 2. Принципиальная схема адиабатической ВАЭС: 1 – компрессор; 2 – электродвигатель; 3 – теплоаккумулятор-теплообменник; 4 – накопитель сжатого воздуха; 5 – бескомпрессорная газовая турбина (БГТ); 6 – электрический генератор

В состав ВАЭС включены: накопитель сжатого воздуха, компрессор с приводом от электродвигателя, бескомпрессорная газовая турбина и электрический генератор, расположенный на одном валу с турбиной. Принцип работы ВАЭС состоит в следующем. Воздух, сжимаемый в компрессоре, адиабатически, в зависимости от степени повышения давления  $\beta$ , нагревается до соответствующей температуры  $T_k$ . С увеличением  $\beta$  повышается температура выходящего из компрессора сжатого воздуха, что, в свою очередь, приводит к увеличению работы, затрачиваемой на привод компрессора. Для получения зависимости конечной температуры от степени сжатия воздуха были проведены расчеты по формуле (15).

В свою очередь, повышение  $T_k$  приводит к увеличению работы сжатия, значения которой были определены по формуле (12). Результаты этих расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Зависимость конечной температуры, удельной эксергии и работы сжатия 1 тыс м<sup>3</sup> атмосферного воздуха от степени повышения его давления

$\beta = \frac{P_k}{P_0}$	Конечная температура сжатого воздуха $T_k$	Термомеханическая эксергия $e_{TM}$		Работа сжатия $I_{сж}$	
		кДж	кВт·ч	кДж	кВт·ч
3	401,24	130,44	36,21	178,5	49,58
5	464,23	206,44	57,22	327,0	90,83
10	565,97	330,88	91,9	639,25	177,58
20	689,43	478,29	132,86	1126,36	312,88
30	774,11	580,45	161,24	1533,54	425,92
40	840,62	660,69	183,52	1896,00	526,8
50	895,91	727,5	202,08	2224,7	617,97
60	943,81	785,12	218,09	2529,63	702,69
70	986,31	836,38	232,39	2814,42	781,7
80	1024,66	882,69	245,13	3085,0	856,94
90	1060,32	925,11	256,98	3349,82	930,3

Полученные результаты позволяют определить энергетический потенциал сжатого воздуха, а значит дают возможность составить эксергетический баланс соответствующих элементов схемы и ВАЭС в целом и определить их КПД.

В рассмотренной схеме для повышения КПД накопителя энергии сжатого воздуха обычно предусматривается утилизация его тепла после компримирования с помощью теплообменника-аккумулятора, через который сжатый воздух проходит, прежде чем попасть в накопитель. Сжатый воздух из накопителя подается в бескомпрессорную турбину предварительно подогретым за счет тепла, запасенного в теплообменнике. Однако в этой схеме теплота сжатого воздуха, поступающего в турбину, может иметь относительно невысокую температуру, существенно меньшую  $T_k$ . Поэтому КПД такой ВАЭС будет не очень высоким. Это не означает, что применение адиабатической ВАЭС никогда не имеет смысла. Как видно из рис. 2, такая схема проста по набору оборудования (отсутствует компрессор для газовой турбины), а следовательно, не требует больших капиталовложений, т. е. имеет экономические преимущества.

Опыт эксплуатации на металлургических заводах газовых утилизационных бескомпрессорных турбин (ГУБТ), работающих на избыточном давлении доменного газа, убедительно показывает их технико-экономическую эффективность. Удельные капитальные вложения на 1 кВт установленной мощности газорасширительной станции (ГРС) с ГУБТ на 35 % меньше, а эксплуатационные издержки на выработку 1 кВт·ч электроэнергии на ней – на 45 % меньше по сравнению с вариантом ТЭЦ [9, 10].

Учитывая изложенное выше в теоретическом разделе, для того, чтобы повысить энергетическую эффективность адиабатической ВАЭС, нужно принципиально изменить её схему. Сжатие в компрессоре должно осуществляться с максимально возможным отводом выделяемого тепла (приближая процесс к изотермическому), а процесс расширения в турбине осуществляться с подводом теплоты (приближая процесс к адиабатическому).

Принципиальная схема такой неадиабатической ВАЭС показана на рис. 3.

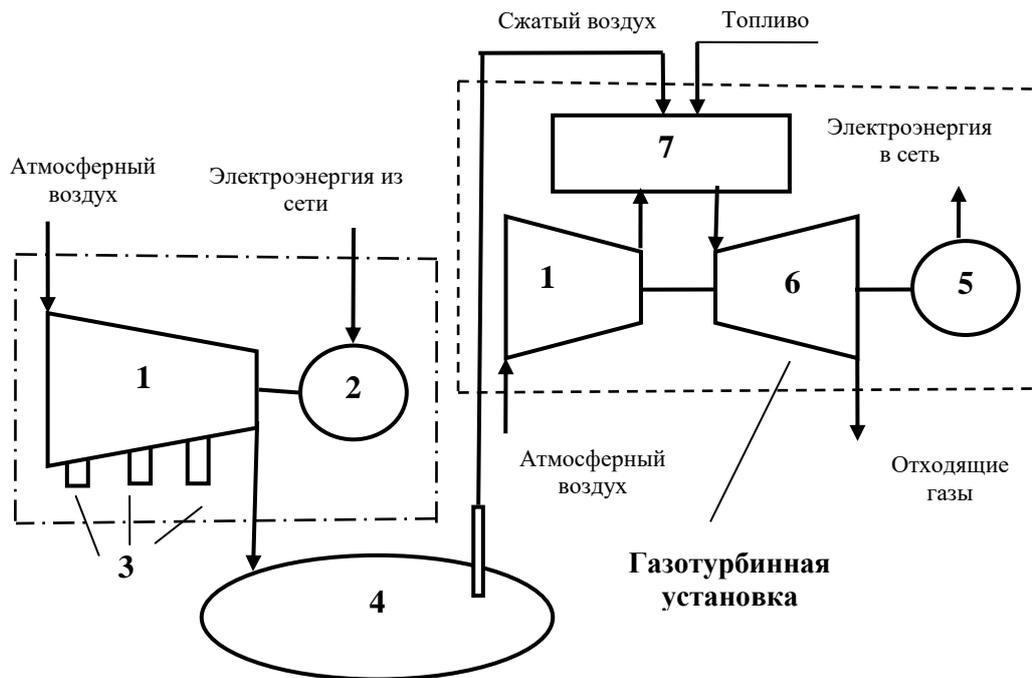


Рис. 3. Принципиальная схема неадиабатической ВАЭС в комбинации с ГТУ:  
 1 – компрессор; 2 – электродвигатель; 3 – кулеры; 4 – накопитель сжатого воздуха; 5 – генератор; 6 – турбина; 7 – камера сгорания

На схеме показано, что для отвода теплоты, выделяемой при сжатии воздуха, компрессор оснащён кулерами. Для повышения эффективности использования энергии сжатого воздуха он направляется не в бескомпрессорную газовую турбину, а в схему обычной газотурбинной установки (ГТУ) открытого типа. Такая ГТУ в своём составе имеет камеру сгорания топлива (газообразного или жидкого), продукты сгорания которого направляются в газовую турбину (ГТ). ГТ своим валом соединена с валом компрессора и электрического генератора. Для сжигания топлива в камеру сгорания подаётся сжатый воздух от собственного компрессора. В общем случае ГТУ может иметь любую схему и работать в автономном режиме, в том числе и в режиме когенерации.

В сочетании ГТУ с накопителем энергии сжатого воздуха, сжатый воздух из хранилища подаётся в камеру сгорания топлива, замещая воздух и работу его сжатия в собственном компрессоре газотурбинной станции. Вследствие этого выработка ГТУ существенно увеличивается. Эффективность работы подобной комбинации ВАЭС + ГТУ может быть повышена путём использования теплоты выходящих из турбины газов (около 600–700 °С). Это тепло можно использовать для нагрева сжатого воздуха перед подачей его в камеру сгорания, что позволит уменьшить количество сжигаемого топлива, а следовательно, уменьшить негативное воздействие объекта на окружающую среду.

Возможен и другой путь использования этого тепла, организовав на ГТУ производство побочной продукции – горячей воды или пара (режим когенерации). Это также ведёт к повышению энергетической эффективности комплекса и снижению вредных выбросов в окружающую среду.

Работающая по схеме (показанной на рис. 3) неадиабатическая (диабатическая) ВАЭС мощностью 290 МВт эксплуатируется в Германии с 1978 года. Она имеет такие характеристики: фаза закачки воздуха в хранилище длится 8 часов; для сжатия воздуха объёмом 300 тыс. м<sup>3</sup> от 46 до 72 атм используется компрессор с электрическим двигателем

мощностью 60 МВт. Во время фазы разрядки станция выдаёт в систему в течение 2 часов мощность 290 МВт. При этом на каждый выданный 1 кВт·ч электроэнергии она дополнительно потребляет 0,8 кВт·ч электроэнергии и 1,6 кВт·ч энергии природного газа.

Используя приведенные характеристики комплекса, недостаточные для составления его полного энергетического баланса, построенного на использовании 1-го и 2-го начал термодинамики [6, 8], авторы попытались всё же оценить эффективность его работы, т. е. определить его КПД. При этом величина накопленной эксергии (потенциал) сжатого воздуха определялась по изложенной выше методике. Как видно из табл. 2, величина достигнутого КПД комплекса составила  $\eta_{\text{компл}} = 29,6\%$ .

Таблица 2

Основные энергетические характеристики комплекса, сочетающего неадиабатическую ВАЭС и газотурбинную установку (реально существующая схема)

Потребляет	Выдает
1. Привод компрессора *(ЭД) $W_{\text{к}} = \frac{N_{\text{д}}}{\eta_{\text{д}} \eta_{\text{к}}} t_3 = \frac{60}{0,93 \cdot 0,85} \cdot 8 = 607,6 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	1*. Генерация электроэнергии в систему $W_{\text{ген}} = P_{\text{м}} \cdot t_{\text{разр}} = 290 \cdot 2 = 580 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
2. Дополнительное потребление электроэнергии $W_{\text{доп}} = W_{\text{ген}} \cdot 0,8 = 580 \cdot 0,8 = 464 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	2*. Накопленная эксергия (потенциал) сжатого воздуха $\Pi_{\text{сж}} = (e_2 - e_1) \cdot V_{\text{в}} = (235 - 195) \cdot 300 = 12 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
3. Дополнительное потребление природного газа $W_{\text{доп газ}} = W_{\text{ген}} \cdot 1,6 = 928 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	
<b>Итого:</b> 1999,6 МВт·ч	$\eta_{\text{компл}} = \frac{592}{1999,6} = 0,296$

Как отмечалось выше, энергетическую эффективность комплекса можно существенно повысить, если изменить его состав путем замены привода компрессора от электродвигателя на привод от ветроэнергетической установки (ВЭУ), что позволит исключить эту статью потребления электроэнергии из сети. В этом случае КПД комплекса может составить  $\eta_{\text{компл}} = 42,5\%$  (табл. 3).

Что касается использования теплоты уходящих газов ГТУ, то для оценки ее влияния на эффективность комплекса не хватает необходимой информации. Оценочным расчётом была определена величина эксергии утилизированной теплоты газов, которая составила  $E_q = 23 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$ . Это позволяет определить величину КПД комплекса, которая может быть

достигнута: 
$$\eta_{\text{компл}} = \frac{592 + 23}{1392} = \frac{615}{1392} = 0,442.$$

Таблица 3

Основные энергетические характеристики комплекса, сочетающего неадиабатическую ВАЭС, газотурбинную установку (ГТУ) и ветроэнергетическую установку (ВЭУ) для повышения его эффективности

Потребляет	Выдает
1. Привод компрессора (ВЭУ)	1*. Генерация электроэнергии в систему $W_{\text{ген}} = P_{\text{м}} \cdot t_{\text{разр}} = 290 \cdot 2 = 580 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$

2. Дополнительное потребление электроэнергии $W_{\text{доп}} = W_{\text{ген}} \cdot 0,8 = 580 \cdot 0,8 = 464 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	2*. Накопленная эксергия (потенциал) сжатого воздуха $\Pi_{\text{сж}} = (e_2 - e_1) \cdot V_B = (235 - 195) \cdot 300 = 12 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$
3. Дополнительное потребление природного газа $W_{\text{доп газ}} = 928 \text{ МВт} \cdot \text{ч}$	
<b>Итого:</b> 1392 МВт·ч	$\eta_{\text{компл}} = \frac{580 + 12}{1392} = \frac{592}{1392} = 0,425$

### Выводы

Накопители энергии сжатого воздуха способны хранить значительное количество потенциальной энергии, которая может быть использована на воздушно-аккумулирующих электростанциях. В зависимости от того, отводится ли теплота сжимаемого агента или нет, ВАЭС подразделяют на два типа – адиабатическая и неадиабатическая. В статье рассматриваются оба типа ВАЭС. Воздух в компрессоре, накопителе и других элементах ВАЭС находится в режимах сжатия-расширения. Это значит, что необходимо уметь определять потенциал сжатого/расширенного воздуха, требуемый для составления эксергетического баланса соответствующих элементов схемы и ВАЭС в целом, без чего невозможно оценить эффективность их работы.

В статье предлагается метод определения энергетического потенциала сжатого воздуха, процедура составления эксергетического баланса и определения КПД соответствующих элементов схемы. На основе проведенного анализа процессов сжатия (расширения) воздуха в адиабатической ВАЭС сделан вывод о том, что такая схема, с позиций термодинамики, не может иметь высокий КПД. Однако этот тип ВАЭС имеет ряд экономических преимуществ: простота, низкие капиталовложения, обусловленные отсутствием компрессора, камеры сгорания для газовой турбины. Для повышения КПД процесса необходимо преобразовать тип ВАЭС в неадиабатический, что потребует изменения схемы и режима работы ее элементов. При этом сжатие в компрессоре должно производиться с максимально возможным отводом тепла, а процесс расширения в ГТУ открытого типа должен осуществляться с подводом тепла.

Оба типа с успехом могут работать совместно с ветроэнергетической установкой (ВЭУ), которая способна заменить электродвигатель компрессора, тем самым сократив потребление электроэнергии из сети.

### Литература

1. Стычинский З.А. Возобновляемые источники энергии: теоретические основы, технологии, технические характеристики, экономика / З.А. Стычинский, Н.И. Воропай. Магдебург–Иркутск: Отто-фон-Герике Университет Магдебург, 2010.
2. Литвак В.В. Основы регионального энергосбережения (научно-технические и производственные аспекты) / В.В. Литвак. Томск: Изд-во НТЛ, 2002.
3. Безруких П.П. Использование ветра. Техника. Экономика. Экология / П.П. Безруких. М.: Колосс, 2008.
4. Бродянский В.М. Эксергетический метод термодинамического анализа / В.М. Бродянский. М.: Энергия, 1973.
5. Степанов В.С. Определение термомеханической эксергии газообразного топлива и потенциала энергосбережения в системах газоснабжения / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова // Промышленная энергетика. 2013. №11. С. 2–6.
6. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes / V.S. Stepanov. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992. 186 p.
7. Эксергетические расчеты технических систем: справочное пособие / Под ред. А.А. Долинского, В. М. Бродянского. Киев: Наукова думка, 1991.
8. Степанов В.С. Эксергетический анализ систем генерирования, транспорта и потребления энергии / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова, Н.В. Старикова. Иркутск: Изд-во ИРНТИУ.

9. Степанов В.С. Термодинамические исследования металлургических процессов: энергетические балансы, эксергетический анализ / В.С. Степанов, С.В. Степанов. Иркутск: Изд-во ИргТУ, 2006.

10. Степанов В.С. Потенциал и резервы энергосбережения в промышленности / В.С. Степанов, Т.Б. Степанова. Новосибирск: Наука, 1990.

#### **Авторы публикации**

**Степанов Владимир Сергеевич** – д-р технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Степанова Татьяна Борисовна** – д-р технических наук, профессор кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

**Старикова Наталья Владимировна** – канд. техн. наук, доцент кафедры «Электроснабжение и электротехника» Иркутского национального исследовательского технического университета.

#### **References**

1. Stychinskiy Z.A. Renewable energy sources: theoretical bases, technical characteristics, economy / Z.A. Stychinskiy, N.I. Voropay. Magdeburg–Irkutsk: Otto-von\_Guericke-Universitat Magdeburg, 2010 (in Russian).

2. Litvak V.V. Principles of regional energy saving (science-technical and production aspects) / V.V. Litvak. Tomsk: NTL, 2002 (in Russian).

3. Bezrukih P.P. Using wind. Technologies. Economics. Ecology / Bezrukih P.P. M.: Coloss, 2008 (in Russian).

4. Brodyanskiy V.M. Exergy method of thermodynamic analysis / V.M. Brodyanskiy . M.: Energy, 1973. (in Russian).

5. Stepanov V.S. Calculating thermo-mechanical exergy of gaseous fuels and potentials of energy saving in gas supply systems /V.S. Stepanov, T.B. Stepanova // Industrial power engineering. 2013. №11. P. 2–6. (in Russian).

6. Stepanov V.S. Analysis of energy efficiency of industrial processes / V.S. Stepanov. Heidelberg: Springer-Verlag, 1992.

7. Exergy calculations of technical systems / Red. A.A. Dolinskiy, V.M. Brodianskiy. Kiev: Naukova dumka, 1991. (in Russian).

8. Stepanov V.S. Exergy analysis for systems of energy generation, transport and consumption / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova, N.V. Starikova. Irkutsk: IIRNITU, 2016. (in Russian).

9. Stepanov V.S. Thermodynamics studies of metallurgical processes: energy balances, exergy analysis / V.S. Stepanov, S.V. Stepanov. Irkutsk: IrGTU, 2013. (in Russian).

10. Stepanov V.S. Potential and reserves of energy saving in industry / V.S. Stepanov, T.B. Stepanova. Novosibirsk: Nauka, 1990. (in Russian).

#### **Authors of the publication**

**Vladimir S. Stepanov** – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

**Tatiana B. Stepanova** – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

**Natalia V. Starikova** – Irkutsk national research technical university, Irkutsk, Russia

*Поступила в редакцию*

*16 октября 2018 г.*