

Профессор В.Я. Губарев, аспирант А.Ю. Картель
(Липецкий гос. техн. ун-т) кафедра промышленной теплоэнергетики
E-mail: zetzervam@gmail.com

Professor V.Ia. Gubarev, graduate A.Iu. Kartel'
(Lipetsk state technical university) Department of industrial heating energy
E-mail: zetzervam@gmail.com

Разработка схемы и эксергетический анализ работы ДГА с возможностью одновременного получения электроэнергии и «глубокого холода»

Development of the scheme and exergy analysis of the EGS with the possibility of the simultaneous production of electricity and "deep cold"

Реферат. Одним из направлений энергосбережения является применение детандер-генераторных агрегатов, преобразующих избыточное давление природного газа в электроэнергию. При применении детандер-генераторного агрегата для использования давления газа с выработкой электроэнергии газовый поток необходимо подогревать, т.к. в результате расширения газа в детандере и соответствующего понижения его температуры возможно образование конденсатов и гидратов в газопроводах и арматуре, импульсных трубках и, как следствие, их засорение или даже закупорка. В связи с этим газ перед детандер-генераторным агрегатом должен быть нагрет так, чтобы на выходе из него температура газа была не менее 0 °С. Предлагается схема, в которой подогрев заменен адсорбционной осушкой, что делает возможным использование детандер-генераторного агрегата при низких температурах без риска образования в нем, либо после него, конденсатов и гидратов. Адсорбционная осушка газа – технологический процесс, который заключается в избирательном поглощении порами поверхности твердого адсорбента молекул воды из газа, с последующим извлечением их из пор посредством применения внешних воздействий. Процесс адсорбционной осушки газа позволяет достигать точки росы в –90 °С. Включив данный блок, либо аналогичный, в схему с ДГА, получаем возможность одновременной выработки электроэнергии и «глубокого холода». Области применения «глубокого холода» очень широки. Наряду с объектами энергетики и химической промышленности, он востребован на предприятиях пищевой промышленности, заводах по производству пива и безалкогольных напитков. Холод необходим как для заморозки, так и для последующего хранения продукции в холодильных терминалах и на складах. Статья содержит схемы адсорбционной установки и установки получения «глубокого холода», описание их работы и эксергетический анализ разработанной схемы.

Summary. One of the areas of energy conservation is the use of an expander-generator sets, that convert pressurized natural gas into electricity. In applying the expander-generator set for using gas pressure power generation gas flow necessary to heat, as a result of expansion of the gas in an expander and a corresponding lowering of the temperature, the formation of condensate and hydrates in gas pipelines and fittings, piping and, as a consequence, their blockage or obstruction. In connection with this gas before detander-generating set to be heated so that at its exit gas temperature was at least 0 °C. A scheme in which the heater is replaced by adsorption drying, which makes it possible to use an expander-generator set at low temperatures without the risk of it or after it, mist and hydrates. Gas adsorption drying - process is selective absorption of the surface pores of the solid adsorbent of water molecules from the gas, and then extract them from the pores by applying external influences. The process of adsorption drying gas can achieve dew point – 90 °C. Including this unit, or equivalent, in the scheme with the DHA, get simultaneous generation of electricity and "deep cold". Area of application "deep cold" is very broad. Along with all energy and chemical industries, he is in demand in the food industry, plants for the production of beer and soft drinks. Chill needed for freezing and for subsequent storage products in refrigeration terminals and warehouses. This article contains diagrams of the adsorption unit, unit the receipt of "deep cold", a description of their work and exergy analysis of the developed scheme.

Ключевые слова: детандер, детандер-генераторный агрегат, адсорбция, адсорбционная осушка, электроэнергия, холод, эксергия, эксергетический анализ.

Keywords: expander, expander-generator sets, adsorption, adsorption drying, electricity, cold, exergy, exergy analysis.

В наступившем столетии по многочисленным исследованиям экспертов будет наблюдаться резкое возрастание роли природного газа в энергетике многих стран. Опубликованные прогнозы свидетельствуют, что к 2030 году потребление газа в мире может удвоиться, а межрегиональные поставки утроиться. В России за 20 лет

планируется увеличение добычи природного газа на 27 % и общий объем добываемого газа будет достигать 750 млрд. м³ в год [1]. В связи с этим все актуальнее становятся вопросы энергосбережения в промышленности.

© Губарев В.Я., Картель А.Ю., 2014

Одним из направлений энергосбережения является применение детандер-генераторных агрегатов (ДГА), преобразующих избыточное давление природного газа в электроэнергию.

Как известно, при применении детандер-генераторного агрегата для использования давления газа с выработкой электроэнергии газовый поток необходимо подогревать, т.к. в результате расширения газа в детандере и соответствующего понижения его температуры возможно образование конденсатов и гидратов в газопроводах и арматуре, импульсных трубках и, как следствие, их засорение или даже закупорка. В связи с этим газ перед детандер-генераторным агрегатом должен быть нагрет так, чтобы на выходе из него температура газа была не менее 0°C [2].

Предлагается схема, в которой подогрев заменен адсорбционной осушкой, что делает возможным использование детандер-генераторного агрегата при низких температурах без риска образования в нем, либо после него, конденсатов и гидратов. Адсорбционная осушка газа – технологический процесс, который заключается в избирательном поглощении порами поверхности твердого адсорбента молекул воды из газа, с последующим извлечением их из пор посредством применения внешних воздействий. Процесс адсорбционной осушки газа позволяет достигать депрессии точки росы в 100°C (минимальная точка росы, достигаемая адсорбцией около -90°C).

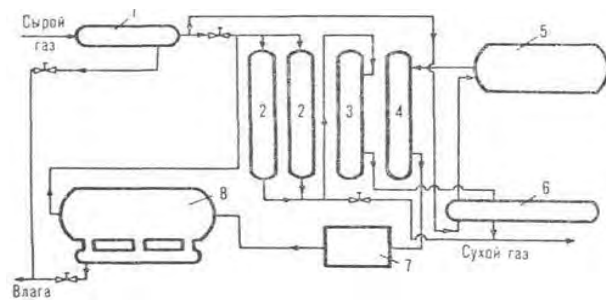


Рисунок 1. Схема адсорбционной установки для осушки газов: 1 и 8 – сепараторы; 2 – адсорберы на стадии осушки; 3 и 4 – адсорберы соответственно на стадиях охлаждения и подогрева; 5 – подогреватель газа; 6 – охладитель газа; 7 – холодильник

Влажный газ поступает в сепаратор 1 для удаления капель влаги, а затем на осушку в адсорберы 2, откуда сухой газ направляют в газопровод. Насыщенный влагой адсорбент регенерируют в адсорбере 4 обдувкой газом, нагретым в аппарате 5. Горячий газ (с температурой $250-350^{\circ}\text{C}$) после регенерации поглопителя охлаждается в аппарате 7, сепарируется

в аппарате 8 от влаги и смешивается с основным потоком газа. В адсорбере 3 поглотитель охлаждается сухим газом до $30-40^{\circ}\text{C}$, после чего аппарат переключают на стадию осушки. Нагреваемый при этом газ перед поступлением в газопровод охлаждается в аппарате 6. Метод может обеспечить глубокую осушку (до точки росы -80°C и ниже), отличается простотой и надежностью аппаратуры.

Включив данный блок, либо аналогичный, в схему с ДГА, получаем возможность одновременной выработки электроэнергии и «глубокого холода».

Холод необходим как для заморозки, так и для последующего хранения продукции в холодильных терминалах и на складах.

Принципиальная схема предлагаемой установки представлена на рисунке 2.

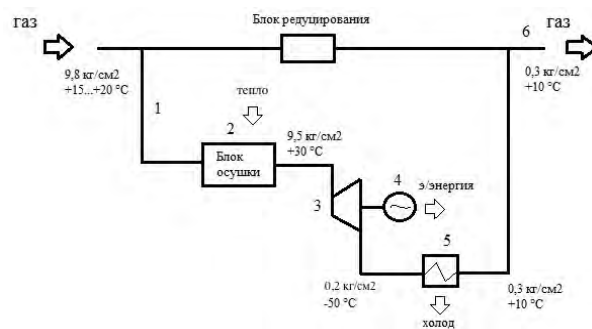


Рисунок 2. Принципиальная схема установки

Схема (рисунок 2) работает следующим образом. Газ высокого давления поступает по трубопроводу 1 в блок осушки 2, где из него удаляются конденсаты и часть гидратов, и направляется в детандер 3. После совершения механической работы в детандере 3, которая преобразуется в электрическую энергию в электрическом генераторе 4, газ с температурой -50°C и давлением $0,2 \text{ МПа}$ направляется в теплообменник 5, где отдает холод теплоносителю для дальнейшего использования конечным потребителем, и с температурой $+10^{\circ}\text{C}$ и давлением $0,3 \text{ МПа}$ направляется в газопровод низкого давления 6.

В зимний период возможно использование тепла окружающей среды и тепла холодильника 7 (рисунок 1) для подогрева газа после ДГА. Окончательная схема в каждом конкретном случае будет зависеть от режима работы объекта и климатических условий.

Проведем эксергетический анализ детандер-генераторных установок для получения холода при следующем режиме работы, а именно,

при определенной температуре и давлении газа на входе в газопровод на ГРП и ГРС.

Таблица 1
Исходные данные для эксергетического анализа схемы

Среда	t, °C (или степень сухости)	P, МПа	h, кДж/кг	S, кДж/кг·°C
Вода	15	0,1	63	0,22
	20	0,1	84	0,3
	80	0,1	335	1,08
Пар	116	0,18	488,18	1,4880
	154	0,1895	2277,56	7,33
	154	0,186	2778,36	7,3403
	258	0,71	2967,688	7,134
Газ	258	0,723	2967,25	7,1249
	- 50	0,2	450	10,4
	10	0,1	560	11
	10	0,3	558	10,5
	15	0,1	575	11,05
	15	0,98	560	9,9
	20	0,98	570	10,0
	30	0,95	593	10,07

Весна (осень) – температура газа на входе в газопровод (+15 °C);

В качестве условия примем, что в этот период температура снимаемого холода должна быть (+20 °C).

Параметры с индексом «0» – значения при параметрах окружающей среды.

В адсорбер 2 входит поток газа, имеющий расход $G_{g1} = 100000 \text{ м}^3/\text{ч}$, температуру $t_{g1} = 15 \text{ °C}$ и давление $p_{g1} = 0,98 \text{ МПа}$, эксергия газа на входе в теплообменник определяется по формуле (1).

$$E_{BX}^A = G_g [(h_{g1} - h_{0g}) - T_0 (s_{g1} - s_{0g})] \quad (1)$$

Энтальпию природного газа определим с помощью H-S диаграммы природного газа. Чтобы определить энтальпию осушенного газа, представим ее в виде формулы смеси газа и воды (2):

$$h_{cm} = a_g \cdot h_g + (1 - a_g) \cdot h_b \quad (2)$$

Норма влагосодержания природного газа в газопроводе $d = 0,2 \text{ г/м}^3$, после осушки $d = 0,02 \text{ г/м}^3$, доля газа до осушки $a_g = 0,9997$, а после осушки будет еще больше, из чего можно сделать вывод, что изменение эксергии будет пренебрежимо мало, тогда $E_{BX} = E_{ВЫХ}$

К адсорберу подводится поток тепла q для регенерации адсорбента от горячего источника, имеющий температуру t_i , эксергия этого потока:

$$E_{q1}^A = G_1 \cdot q \cdot (1 - \frac{T_0}{T_1}) \quad (3)$$

Из адсорбера газ выходит с температурой $t_{g\text{тд}1} = t_{g1}$ и давлением $p_{g\text{тд}1} = p_{g1}$, его эксергия остается неизменной.

Поскольку полезная работа в адсорбере не производится, то потерю работоспособности газа в нем найдем по формуле (4):

$$D^A = (E_{BX}^A + E_{q1}^A) - E_{ВЫХ}^A \quad (4)$$

После адсорбера осушенный поток газа направляется в детандер 3, где происходит его расширение с совершением механической работы. Параметры газа перед детандером G_{g1} , p_{gD1} , и t_{gD1} , параметры газа на выходе из детандера $G_{g1\text{ВЫХ}}$, $p_{gD1\text{ВЫХ}}$ и $t_{gD1\text{ВЫХ}}$.

Соответственно:

$$E_{BX}^{D1} = E_{ВЫХ}^{A1} \quad (5)$$

Эксергия газа на выходе из детандера определяется по формуле:

$$E_{ВЫХ}^D = G_g [(h_{gD2} - h_{0g}) - T_0 (s_{gD2} - s_{0g})] \quad (6)$$

Поскольку детандер производит полезную работу $l_{\text{полезн}} = N_{D1}$, то потерю работоспособности определим по формуле:

$$D^D = (E_{ВЫХ}^D + E_{ВЫХ}^D) - N_{D1} \quad (7)$$

После прохождения детандера газ направляется в теплообменник 5, где отдает свой холод потребителю. Поток газа имеет параметры t_{gD2} и p_{gD2} , его эксергия равна:

$$E_{ВЫХ}^{Tg} = E_{ВЫХ}^{D1} \quad (8)$$

В теплообменник входит поток (вода), имеющий расход G_B температуру $t_{ВВХ}$ и давление $p_{ВВХ}$, эксергия воды на входе в теплообменник:

$$E_{ВЫХ}^{TB} = G_B [(h_{ВВХ} - h_{0B}) - T_0 (s_{ВВХ} - s_{0B})] \quad (9)$$

Из теплообменника газ выходит с температурой t_{gx} , давлением p_{gx} , его эксергия: $G_g = \text{const} = 100 \cdot 10^3 \text{ м}^3/\text{ч}$.

$$E_{ВЫХ}^{Tg} = G_g [(h_{gx} - h_{0g}) - T_0 (s_{gx} - s_{0g})] \quad (10)$$

Из теплообменника вода выходит с температурой $t_{ВВЫХ}$, давлением $p_{ВВЫХ}$, ее эксергия:

$$E_{ВЫХ}^{TB} = G_B [(h_{ВВЫХ} - h_{0B}) - T_0 (s_{ВВЫХ} - s_{0B})] \quad (11)$$

Поскольку полезная работа в теплообменнике не производится, то получим:

$$D^{TX} = (E_{ВЫХ}^{Tg} + E_{ВЫХ}^{TB}) - (E_{ВЫХ}^{Tg} + E_{ВЫХ}^{TB}) \quad (12)$$

Найдем расход воды через теплообменник:

$$G_B = \frac{G_g \cdot (h_{gx} - h_{gD2})}{(h_{ВВЫХ} - h_{ВВХ})} \quad (13)$$

Суммарная величина потерь работоспособности по всему циклу детандер-генераторной установки для получения холода составит:

$$D_{\text{хст}} = D^A + D^D + D^{TX} \quad (14)$$

Таблица 2

Эксергетический баланс детандер-генераторной установки для одновременного получения электроэнергии и холода. Параметры газа на входе: $t=(+15^{\circ}\text{C})$, $P_{\text{вх}}=0,98$ МПа

	№ п.п.	Узел установки	Обозначение	Значение, кВт
Потери эксергии	1	Адсорбер	D^A	537,5
	2	Детандер	D^D	2100,02
	3	Холодильник	D^{TX}	-886,62
	Итого		$D_{\text{уст}}$	1750,9
Эксергетический КПД			$\eta_e=0,849$	

Сравним предложенную схему со схемами, в которых используется подогрев газа. Возьмем стандартную схему, которая состоит из теплообменного аппарата для подогрева газа и детандера. Схема работает следующим образом: газ поступает в теплообменный аппарат, где подогревается до необходимой температуры, затем он попадает в детандер, где расширяется, выполняя работу, и выходит с той же температурой, что и был до подогрева и заданным рабочим давлением.

Рассмотрим два варианта.

Схема с подогревом газа, входные параметры и количество теплоты на подогрев примем то же самое, что и использовалось на регенерацию адсорбента, что позволит подогреть газ до 65°C , параметры газа на выходе из схемы также одинаковы. Используя формулы, представленные выше, проведем тот же анализ, получим следующие данные.

Таблица 3

Эксергетический баланс детандер-генераторной установки для получения электроэнергии с подогревом газа до 65°C . Параметры газа на входе: $t=(+15^{\circ}\text{C})$, $P_{\text{вх}}=0,98$ МПа

	№ п.п.	Узел установки	Обозначение	Значение, кВт
Потери эксергии	1	Теплообменник	D^T	583,33
	2	Детандер	D^D	4500,04
	Итого		$D_{\text{уст}}$	5083,37
Эксергетический КПД			$\eta_e=0,628$	

Полученные данные показывают, что КПД схемы с подогревом до 65°C чуть больше 60%, при том, что КПД разработанной схемы составляет 85%.

Рассмотрим другой вариант схемы с подогревом, зададимся оптимальной температурой подогрева 90°C (температуру считаем оптимальной, т.к. при относительном внутреннем КПД детандера 0,7-0,85 и давлении 0,98 МПа из h-s диаграммы природного газа получаем температуру на выходе 15°C). Остальные параметры оставим без изменения: входные и выходные. Используя тот же алгоритм расчета, получим следующие данные.

Таблица 4

Эксергетический баланс детандер-генераторной установки для получения электроэнергии с подогревом газа до 90°C .

Параметры газа на входе: $t=(+15^{\circ}\text{C})$, $P_{\text{вх}}=0,98$ МПа

	№ п.п.	Узел установки	Обозначение	Значение, кВт
Потери эксергии	1	Теплообменник	D^T	563,26
	2	Детандер	D^D	3600,03
	Итого		$D_{\text{уст}}$	4163,29
Эксергетический КПД			$\eta_e=0,707$	

Данная схема более эффективна в сравнении с предыдущей, где подогрев до 65°C , ее КПД возрос до 70 %, однако пришлось увеличить количество тепла, подведенное к теплообменному аппарату на 33 %, и несмотря на это ее КПД все еще далек от КПД предложенной схемы, который составляет 85 %.

Оценив эффективность схемы с осушкой относительно схем с подогревом газа, проведем анализ влияния сезонности и входных параметров на эксергетический КПД.

Зададимся следующими условиями:

1. Относительный внутренний КПД детандера не превышает 85%.

2. Параметры газа на выходе постоянны: температура $t_g = -50^{\circ}\text{C}$ и давление $p_g = 0,2$ МПа.

3. Параметры газа и окружающей среды по сезонам:

3.1. Зима, газ $+5^{\circ}\text{C}$, воздух -15°C ;

3.2. Весна, газ $+5^{\circ}\text{C}$, воздух $+5^{\circ}\text{C}$;

3.3. Лето, газ $+20^{\circ}\text{C}$, воздух $+15^{\circ}\text{C}$;

3.4. Осень, газ $+10^{\circ}\text{C}$, воздух $+10^{\circ}\text{C}$.

4. Диапазон изменения входного давления от 0,7 МПа (минимальное значение вход-

ного давления учитывая п.1) до 1,3 МПа с шагом 0,3 МПа.

5. Расход газа постоянный $G_{g1} = 100000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Специально были выбраны разные температуры для весны и осени, чтобы наиболее полно отследить влияние исходных данных и температуры окружающей среды на потери эксергии.

Проведем тот же расчет (1-14) для каждого из сезонов и входных давлений.

По полученным данным построим рисунок 3.

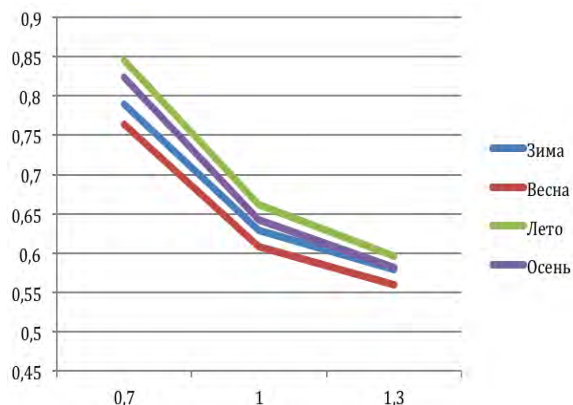


Рисунок 3. Влияние входных параметров на эксергетический КПД одноступенчатой схемы.

ЛИТЕРАТУРА

1 Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Консультант Плюс: справочная правовая система [Электронный ресурс]: справочная правовая система. М., 2014. Режим доступа: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/?frame=1.

2 Агабабов В.С., Джураева Е.В., Корягин А.В., Лоозе П. и др. Сравнение различных способов подогрева газа в детандер-генераторных агрегатах на ТЭЦ // Вестник МЭИ. 2003. № 5.

По графику (рисунок 3) можно сделать выводы:

1. Основное влияние оказывает входное давление, т.к. оно напрямую связано с КПД детандера, так, при давлении 0,7 МПа КПД 80-85 %, при увеличении давления в 2 раза КПД падает на 20-25 %.

2. Сезонность оказывает незначительное влияние по сравнению со входным давлением (3-5 %). Самый низкий КПД весной, это связано с тем, что при равных входных параметрах газа (сравниваем с зимой) температура окружающей среды ниже, поэтому эксергетический потенциал входного газа выше, чем весной.

Проведенные расчеты позволяют сделать следующие выводы:

1. Эксергетический КПД схемы с осушкой выше на 22 % за счет использования меньшего количества теплоты (только на регенерацию).

2. В предлагаемой схеме потери работоспособности относительно схем с подогревом уменьшились в 2-2,5 раза.

3. Появилась возможность охлаждения дымовых газов до более низкой температуры без риска низкотемпературной конденсации в связи с осушкой природного газа.

REFERENCES

1 Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030. Konsul'tant plus: spravochnaia pravovaia sistema [Energy Strategy of Russia for the period up to 2030. Consultant Plus: background legal system]. Moscow, 2014. Available at: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/?frame=1. - Evidence of Russian Press Ministry E № 77-6731. (In Russ.).

2 Agababov V.S. Dzhuraeva E.V., Koriagin A.V., Looze P. et al. Comparison of different methods of heating the gas in the part-der-generating units at CHP. Vestnik MEI. [Bulletin of MEI], 2003, no. 5. (In Russ.).