

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ ДЕТАНДЕР-ГЕНЕРАТОРНОГО АГРЕГАТА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ ОДНОВРЕМЕННОГО ПОЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И ХОЛОДА*

В. Я. Губарев, А. Г. Арзамасцев, А. Ю. Картель

*Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»,
ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк;
zetzervam@gmail.com*

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

Аннотация: Рассмотрены энергоэффективные схемы с одно- и двухступенчатым расширением, в которых подогрев газа заменен адсорбционной осушкой, что делает возможным использование детандер-генераторного агрегата при низких температурах без риска образования в нем, либо после него, конденсатов и гидратов. Проведен эксергетический анализ каждой из схем в целях выявления влияния входных параметров и параметров окружающей среды на эксергетический коэффициент полезного действия. Показан эксергетический анализ одно- и двухступенчатой энергоэффективных схем с детандер-генераторными агрегатами с возможностью выработки электроэнергии и холода. Выведены графики зависимости влияния входных параметров на эксергетический коэффициент полезного действия. Показано, что несмотря на высокие показатели эффективности одноступенчатой схемы с точки зрения эксергетического анализа, она имеет ряд ограничений в использовании и в некоторых случаях может быть значительно менее эффективна по сравнению с двухступенчатой.

В настоящее время в нашей стране все бóльшую актуальность приобретает проблема энергосбережения. Один из вариантов решений данной проблемы – использование дополнительных энергетических потенциалов традиционных энергоресурсов. В частности, при применении газообразного топлива в качестве источника тепла практически не используется энергия давления транспортируемого газа. Выходом из данной ситуации является установка перед котлом детандер-генераторного агрегата (ДГА), в котором энергия газа преобразуется в детандере в механическую работу, а механическая энергия, полученная в детандере, может быть преобразована в электрическую в генераторе, соединенном с детандером.

Интерес к использованию схем с ДГА возрос в связи с озвученной Президентом РФ «Энергетической стратегией...» на период до 2030 года, суть которой заключается в увеличении роли природного газа в энергетике, а также ряде других областей промышленности страны [1]. В настоящее время в мире известно более двухсот установок с использованием газорасширительных машин, которые широко применяются в криогенной технике, для производства холода. При применении

* По материалам доклада на конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и энергоэффективности в технических системах» (см. 2015. Т. 21, № 3).

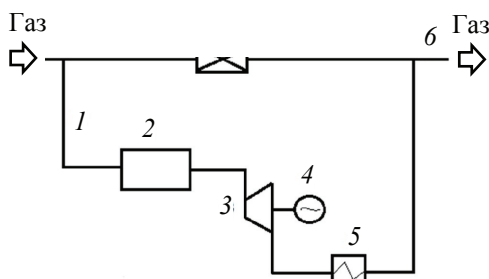


Рис. 1. Принципиальная схема установки

детандер-генераторного агрегата для выработки электроэнергии происходит подогрев газового потока [2].

В работе [3] предложена принципиальная схема (рис. 1), где 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. 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 направляется в теплообменник 5, где отдает холод теплоносителю для дальнейшего использования конечным потребителем, после чего направляется в газопровод низкого давления 6. Данная схема ДГА дает возможность одновременной выработки электроэнергии и холода [3].

В качестве одного из основных критериев эффективности, помимо КПД, выберем удельную выработку электроэнергии на кубометр газа.

Для проведения эксергетического анализа влияния входного давления и сезонности на КПД схемы зададимся следующими условиями:

- 1) относительный внутренний КПД детандера не превышает 85 %;
- 2) параметры газа на выходе постоянны: температура $t_r = -50$ °С и давление $p_r = 0,2$ МПа;

- 3) параметры газа и окружающей среды по сезонам:

- зима: газ +5 °С, воздух –15 °С;
- весна: газ +5 °С, воздух +5 °С;
- лето: газ +20 °С, воздух +15 °С;
- осень: газ +10 °С, воздух +10 °С;

- 4) диапазон изменения входного давления от 0,7 МПа (минимальное значение входного давления, учитывая п. 1) до 1,3 МПа с шагом 0,3 МПа;

- 5) расход газа – постоянный: $G_{r1} = 10^5$ м³/ч.

Параметры газа, пара и воды приведены в табл. 1. Рассмотрим одно- и двухступенчатые схемы с ДГА с возможностью получения электроэнергии и холода. Приведем алгоритм расчета двухступенчатой схемы.

1. Расширение в первой ступени при максимальном КПД 85 % (учитывая данный факт, минимальное значение входного давления 1 МПа).

2. Расширение в первой ступени происходит до достижения минимально возможной температуры (–50 °С).

3. Расширение во второй ступени происходит до давления, принятого в одноступенчатой схеме, чтобы параметры на выходе после последнего теплообменного аппарата были одинаковыми в обеих схемах.

Выбраны разные температуры для весны и осени для более полного анализа влияния исходных данных и температуры окружающей среды на потери эксергии. Схема установки взята из [3]. Параметры при условиях окружающей среды обозначены с индексом «0».

детандер-генераторного агрегата для выработки электроэнергии происходит подогрев газового потока [2].

В работе [3] предложена принципиальная схема (рис. 1), где 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. 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 направляется в теплообменник 5, где отдает холод теплоносителю для дальнейшего использования конечным потребителем, после чего направляется в газопровод низкого давления 6. Данная схема ДГА дает возможность одновременной выработки электроэнергии и холода [3].

В качестве одного из основных критериев эффективности, помимо КПД, выберем удельную выработку электроэнергии на кубометр газа.

Для проведения эксергетического анализа влияния входного давления и сезонности на КПД схемы зададимся следующими условиями:

- 1) относительный внутренний КПД детандера не превышает 85 %;
- 2) параметры газа на выходе постоянны: температура $t_r = -50$ °С и давление $p_r = 0,2$ МПа;

- 3) параметры газа и окружающей среды по сезонам:

- зима: газ +5 °С, воздух –15 °С;
- весна: газ +5 °С, воздух +5 °С;
- лето: газ +20 °С, воздух +15 °С;
- осень: газ +10 °С, воздух +10 °С;

- 4) диапазон изменения входного давления от 0,7 МПа (минимальное значение входного давления, учитывая п. 1) до 1,3 МПа с шагом 0,3 МПа;

- 5) расход газа – постоянный: $G_{r1} = 10^5$ м³/ч.

Параметры газа, пара и воды приведены в табл. 1. Рассмотрим одно- и двухступенчатые схемы с ДГА с возможностью получения электроэнергии и холода. Приведем алгоритм расчета двухступенчатой схемы.

1. Расширение в первой ступени при максимальном КПД 85 % (учитывая данный факт, минимальное значение входного давления 1 МПа).

2. Расширение в первой ступени происходит до достижения минимально возможной температуры (–50 °С).

3. Расширение во второй ступени происходит до давления, принятого в одноступенчатой схеме, чтобы параметры на выходе после последнего теплообменного аппарата были одинаковыми в обеих схемах.

Выбраны разные температуры для весны и осени для более полного анализа влияния исходных данных и температуры окружающей среды на потери эксергии. Схема установки взята из [3]. Параметры при условиях окружающей среды обозначены с индексом «0».

Таблица 1

Исходные данные для эксергетического анализа схем

Среда	t , °С	p , МПа
Вода	15	0,1
	20	0,1
	80	0,1
Пар	154	0,186
	258	0,723
Газ	– 50	0,2
	10	0,3

В адсорбер входит поток газа, имеющий расход газа $G_{Г1} = 10^5$ м³/ч, температуру $t_{Г1}$ и давление $p_{Г1}$. Эксергия газа на входе в теплообменник определяется по формуле

$$E_{вх}^a = G_{Г} [(h_{Г1} - h_{Г0}) - T_0 (s_{Г1} - s_{Г0})], \quad (1)$$

где $h_{Г1}, h_{Г0}$ ($s_{Г1}, s_{Г0}$) – энтальпия (энтропия) газа на входе в адсорбер и при условиях окружающей среды соответственно; T_0 – температура окружающей среды.

Энтальпию природного газа определим с помощью h - s -диаграммы. Чтобы определить энтальпию осушенного газа, представим ее в виде формулы смеси газа и воды

$$h_{см} = a_{Г} h_{Г} + (1 - a_{Г}) h_{в}, \quad (2)$$

где $h_{см}, h_{в}$ – энтальпия смеси газа и воды и энтальпия воды соответственно; $a_{Г}$ – доля газа в смеси.

Норма d влагосодержания природного газа в газопроводе до и после осушки – 0,2 и 0,02 г/м³ соответственно, доля газа в смеси до осушки $a_{Г} = 0,9997$, после осушки будет стремиться к 1, из чего можно сделать вывод, что осушка газа практически не повлияет на его эксергию, тогда $E_{вх}^a = E_{вых}^a$ ($E_{вых}^a$ – эксергия газа на выходе из адсорбера).

К адсорберу подводится поток тепла q для регенерации адсорбента от горячего источника, имеющего температуру T_1 . Эксергия потока

$$E_{q1}^a = G_1 q \left(1 - \frac{T_0}{T_1} \right). \quad (3)$$

Параметры газа на выходе из адсорбера равны параметрам на входе в детандер: $t_{Г2} = t_{Г,д1}, p_{Г2} = p_{Г,д1}$, при этом его эксергия остается неизменной.

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

$$D^a = (E_{вх}^a + E_{q1}^a) - E_{вых}^a. \quad (4)$$

После адсорбера осушенный поток газа направляется в детандер, где происходит его расширение с совершением механической работы. Параметры газа на входе в детандер – $G_{Г,д1}, p_{Г,д1}, t_{Г,д1}$, параметры газа на выходе из детандера – $G_{Г,д1,вых}, p_{Г,д1,вых}, t_{Г,д1,вых}$.

Соответственно:

$$E_{вх}^{д1} = E_{вых}^a. \quad (5)$$

Эксергия газа на выходе из детандера определяется по формуле

$$E_{вых}^{д1} = G_{Г} [(h_{Г,д1} - h_{Г0}) - T_0 (s_{Г,д1} - s_{Г0})], \quad (6)$$

где $h_{Г,д1}, h_{Г0}$ ($s_{Г,д1}, s_{Г0}$) – энтальпия (энтропия) газа на входе в детандер и при условиях окружающей среды соответственно.

Поскольку детандер производит полезную работу $l_{полезн} = N_{д1}$, то потери работоспособности определим по формуле

$$D^{д1} = (E_{вх}^{д1} + E_{вых}^{д1}) - N_{д1}, \quad (7)$$

где $N_{д1}$ – мощность, вырабатываемая детандером.

После прохождения детандера, газ направляется в теплообменник, где отдает свой холод потребителю. Параметры газа на выходе из детандера равны параметрам на входе в теплообменник: $t_{г.д2} = t_{т1}$, $p_{г.д2} = p_{т1}$,

$$E_{вх}^T = E_{вых}^D. \quad (8)$$

В теплообменник входит поток (вода), имеющий расход G_B , температуру t_B и давление p_B . Эксергия воды на входе в теплообменник

$$E_{вх}^{T,B} = G_B [(h_{вх} - h_{в0}) - T_0 (s_{вх} - s_{в0})], \quad (9)$$

где $h_{вх}$, $h_{в0}$ ($s_{вх}$, $s_{в0}$) – энтальпия (энтропия) воды на входе в теплообменник и при условиях окружающей среды соответственно.

Эксергия выходящего из теплообменника газа с температурой $t_{т1}$ и давлением $p_{т1}$

$$E_{вых}^T = G_r [(h_{т2} - h_{т0}) - T_0 (s_{т2} - s_{т0})], \quad (10)$$

где $h_{т2}$, $s_{т2}$ – энтальпия и энтропия газа на выходе из теплообменника соответственно.

Эксергия воды на выходе из теплообменника

$$E_{вых}^{T,B} = G_B [(h_{вых} - h_{в0}) - T_0 (s_{вых} - s_{в0})]. \quad (11)$$

где $h_{вых}$, $s_{вых}$ – энтальпия и энтропия воды на выходе из теплообменника.

Поскольку полезная работа в теплообменнике не производится, то получим

$$D^T = (E_{вх}^T + E_{вх}^{T,B}) - (E_{вых}^T + E_{вых}^{T,B}). \quad (12)$$

Найдем расход воды через теплообменник

$$G_B = \frac{G_r (h_{т1} - h_{т2})}{(h_{вых} - h_{вх})}. \quad (13)$$

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

$$D_{уст} = D^a + D^D + D^T. \quad (14)$$

Полученные данные для входного давления 1 МПа сведены в табл. 2.

Таблица 2

Эксергетический баланс детандер-генераторных одно- и двухступенчатой установок для одновременного получения электроэнергии и холода по сезонам при $p_{вх} = 1$ МПа

Сезон	Установка			
	одноступенчатая		двухступенчатая	
	$D_{уст}$, кВт	КПД	$D_{уст}$, кВт	КПД
Зима	1644,65	0,879	2686,86	0,6075
Весна	2132,15	0,863	3103,53	0,5768
Лето	1813,40	0,900	2898,84	0,6217
Осень	1688,40	0,888	3155,3	0,5755

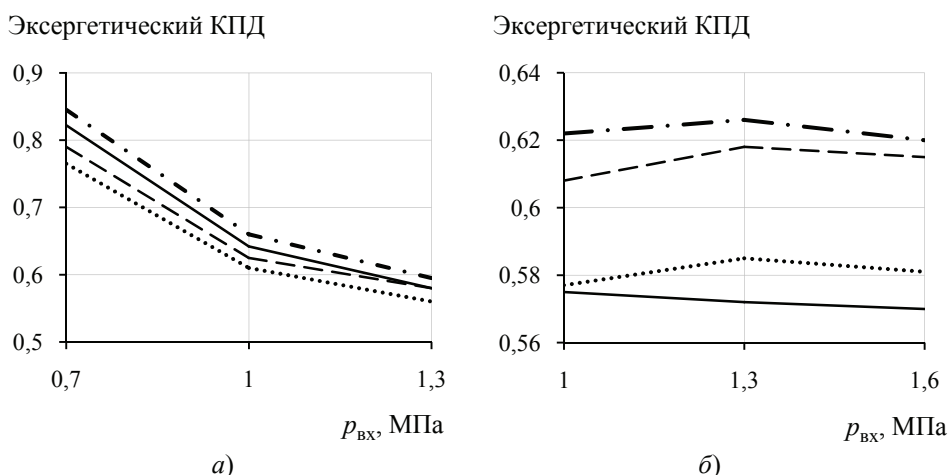


Рис. 2. Влияние входного давления $p_{вх}$ на эксергетические КПД одно- (а) и двухступенчатой (б) схем:
 ———— — осень; — — — зима; — · — · — лето; ······ — весна

Проведя аналогичные расчеты для других значений входных параметров и используя полученные данные, построим график зависимости потери эксергии и эксергетического КПД от входного давления по сезонам для одноступенчатой схемы (рис. 2, а).

Двухступенчатая схема рассчитывается так же, как и одноступенчатая, но для второй ступени после формулы (13) возвращаемся к (6) и ведем расчет до получения результата. В формуле (14) добавляем к общей потере работоспособности величины потерь во второй ступени детандера и во втором теплообменном аппарате.

Для двухступенчатой схемы на рис. 2, б показаны графики влияния входного давления на эксергетический КПД, по которым можно сделать следующие выводы.

1. Наибольший эксергетический КПД у одноступенчатой схемы, однако, при тех же давлениях (1 и 1,3 МПа) при ее использовании вырабатывается на 30 % меньше электроэнергии и холода по сравнению с двухступенчатой.

2. Важный фактор – эксергетический потенциал холода: чем выше потенциал, тем выше температура окружающей среды. Таким образом, эксергетический КПД летом выше всех остальных.

3. Эксергетический КПД одноступенчатой схемы зависит от входного давления; КПД двухступенчатой схемы практически не подвержен этому влиянию.

Разделив вырабатываемую детандером электрическую мощность на количество газа, получим удельную выработку электроэнергии на 1 м³ газа. Полученные данные для одно- и двухступенчатой схем сведем в табл. 3.

Таблица 3

**Удельная выработка, Вт/м³,
 электроэнергии на 1 м³ газа
 детандер-генераторной
 одно- и двухступенчатой установок
 для одновременного получения
 электроэнергии и холода
 по сезонам при $p_{вх} = 1$ МПа**

Сезон	Одноступенчатая схема	Двухступенчатая схема
Зима	17,71	23,91
Весна	17,71	23,91
Лето	21,25	28,33
Осень	19,48	24,79

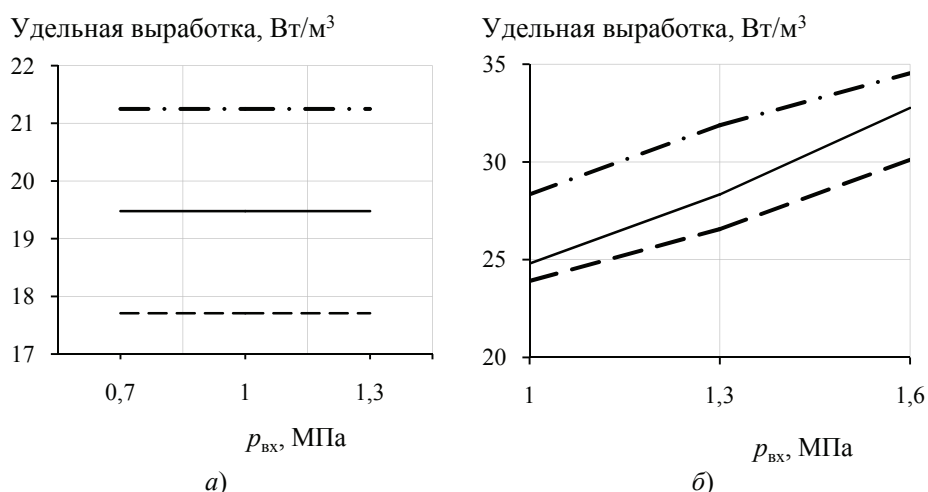


Рис. 3. Удельная выработка электроэнергии по сезонам для одно- (а) и двухступенчатой (б) схем:
 — — — — зима/весна; — — — — лето

Данные по всем давлениям для каждого сезона для одно- и двухступенчатой схем показаны на рис. 3.

Анализ полученных графиков удельной выработки энергии по сезонам для одно- и двухступенчатой схем позволяет сделать следующие выводы.

1. С увеличением входного давления, удельная выработка электроэнергии на единицу газа растёт.

2. Если удельная выработка электроэнергии с повышением входного давления не изменяется, можно говорить о недостаточном использовании эксергетического потенциала газа и рекомендовать увеличение числа ступеней расширения в детандере.

3. Сезонность оказывает незначительное влияние на удельную выработку электроэнергии.

Заключение. Несмотря на высокие показатели эффективности одноступенчатой схемы с точки зрения эксергетического анализа, она имеет ряд ограничений в использовании и в некоторых случаях может быть значительно менее эффективна по сравнению с двухступенчатой.

Список литературы

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года : утв. распоряжением Правительства РФ от 13 ноября 2009 г. № 1715-р [Электронный ресурс] // КонсультантПлюс : справ. правовая система – Режим доступа : http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/?frame=1 (дата обращения: 11.02.2016).

2. Сравнение различных способов подогрева газа в детандер-генераторных агрегатах на ТЭЦ / В. С. Агабабов [и др.] // Вестн. МЭИ. – 2003. – № 5. – С. 101 – 103.

3. Губарев, В. Я. Разработка схемы и эксергетически анализ работы ДГА с возможностью одновременного получения электроэнергии и «глубокого холода» / В. Я. Губарев, А. Ю. Картель // Вестн. Воронеж. гос. университета инженер. технологий. – 2014. – № 3. – С. 40 – 44.

The Analysis of the Influence of Input Parameters on EGS Performance with the Possibility of Simultaneous Production of Electricity and Cold

V. Ya. Gubarev, A. G. Arzamastsev, A. Yu. Kartel

*Department of Industrial Power Systems , Lipetsk State Technical University;
zetzervam@gmail.com*

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

Abstract: One of the directions of energy saving is the use of the expander-generator units which allow using the potential energy of pressure of the transported gas to generate electricity. When using the expander-generator set gas stream is to be heated. We considered energy-efficient schemes with single-stage and two-stage extension in which gas heating is replaced with adsorption drying, which makes it possible to use the expander-generator set at low temperatures without the risk of forming condensates and hydrates. We conducted the exergy analysis of each of the schemes to identify the influence of input parameters and environmental parameters on its exergy efficiency. The article contains the exergy analysis of single-stage and two-stage energy-efficient schemes with the expander-generator units able to generate electricity and cold, graphs depending on the influence of input parameters on the exergetic coefficient of performance, and conclusions. It is shown that despite the high efficiency of a single-stage scheme from the point of view of the exergy analysis, it has limitations in use and in some cases may be significantly less effective in comparison with a two-stage scheme.

References

1. available at: http://consultant.ru/document/cons_doc_LAW_94054/?frame=1 (accessed 11 February 2016). (In Russ.)
2. Agababov VS Juraeva EV, Kohryagin AV Loose P. Heimer Y. [Comparison of different methods of heating the gas in the part-der-generating units at CHP], *Vestnik MEI [MPEI Vestnik]*, 2003, no. 5, pp. 101-103. (In Russ.)
3. Gubarev V.Ya., Kartel' A.Yu. [Development of the scheme and exergy analysis of the EGS with the possibility of the simultaneous production of electricity and “deep cold”], *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Herald of the Voronezh State University of Engineering Technology], 2014, no. 3, pp. 40-44. (In Russ., abstract in Eng.)

Analyse des Einflusses der Eingangsparameter auf die Effektivität der Arbeit der Detander-Generatoranlage mit der Möglichkeit des gleichzeitigen Erhaltens der Elektroenergie und der Kälte

Zusammenfassung: Es sind die energieeffektiven Schemen mit den ein- und zweigestufigen Ausdehnungen betrachtet, in denen die Anwärmung des Gases durch das Adsorptionstrochren ersetzt ist, was die Nutzung der Detander-Generatoranlage bei

den niedrigen Temperaturen ohne Risiko der Bildung darin oder nach ihr der Kondensate und der Hydrate ermöglicht. Es ist die Exergieanalyse jedes der Schemen zwecks der Aufspürung des Einflusses der Eingangsparameter und der Parameter der Umwelt auf den Exergiewirkungsgrad durchgeführt. Es ist die Exergieanalyse der eingestufigen und zweigestufigen energieeffektiven Schemen mit den Detander-Generatoranlagen mit der Möglichkeit der Leistung der Elektroenergie und der Kälte gezeigt. Es sind die Zeitpläne der Abhängigkeit des Einflusses der Eingangsparameter auf den Exergiewirkungsgrad dargelegt, es sind die Schlussfolgerungen gemacht. Es ist gezeigt, dass ungeachtet der hohen Kennziffern der Effektivität des eingestuftes Schemas vom Standpunkt der Exergieanalyse, hat sie die Reihe der Beschränkungen in der Nutzung und kann im Vergleich mit den zweistufigen in einigen Fällen weniger wirksam sein.

**Analyse de l'influence des paramètres d'entrée sur l'efficacité
du fonctionnement de l'extenseur-producteur de l'assemblée avec
la possibilité de l'obtention simultanée de l'énergie électrique et du froid**

Résumé: Sont examinés les schémas de l'efficacité énergétique à un et deux étages d'extensions dans lesquels le chauffage du gaz est remplacé par le séchage d'adsorption, ce qui rend possible l'utilisation de l'extenseur-producteur de l'assemblée lors de basses températures sans risque de la formation des condenseurs et des hydrates. Est effectuée une analyse des schémas afin de déterminer l'influence des paramètres d'entrée et des paramètres de l'environnement sur le coefficient de rendement. Est montrée l'analyse des schémas à une et à deux étapes avec l'extenseur-producteur de l'assemblée avec la possibilité de produire de l'énergie électrique et du froid. Sont proposés des graphiques de la dépendance de l'influence des paramètres d'entrée sur le coefficient économique; sont faites des conclusions.

Авторы: *Губарев Василий Яковлевич* – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика»; *Арзамасцев Алексей Геннадиевич* – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика»; *Картель Александр Юрьевич* – аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.

Рецензент: *Коршиков Владимир Дмитриевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная теплоэнергетика», ФГБОУ ВПО «Липецкий государственный технический университет», г. Липецк.
