

УДК 621.515

С. А. Прилипко
И. Н. Тертышный
Р. А. Лазоренко

ПАО «Сумское НПО им. М. В. Фрунзе»
(г. Сумы, e-mail: tkm@frunze.com.ua)

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК С ГАЗОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ ДЛЯ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

На основе применения эксергетического метода выполнен термодинамический анализ технологической схемы турбокомпрессорной установки нефтяного газа, созданной на основе агрегата ТКА-Ц-8БД/0,3-8,16 с газотурбинным двигателем НК-14СТ и центробежным компрессором мощностью 8 МВт. Определены показатели эффективности установки как для проектного, так и фактического режимов работы в составе комплекса.

З використанням ексергетичного методу виконано термодинамічний аналіз технологічної схеми турбокомпресорної установки нафтового газу, створеної на основі агрегату ТКА-Ц-8БД/0,3-8,16 з газотурбінним двигуном НК-14СТ і відцентровим компресором потужністю 8 МВт. Визначені показники ефективності установки як для проектного, так і фактичного режимів роботи у складі комплексу.

Введение

Настоящая работа посвящена дальнейшему развитию метода проектирования блочно-комплектных турбокомпрессорных установок (ТКУ) нефтяного газа (н.г.) на основе системного подхода и эксергетического метода анализа технологических схем (ТС) компрессорных установок на примере анализа эффективности рабочего процесса ТКУ, созданной в ПАО «Сумское НПО им. М.В. Фрунзе» (далее ПАО) на основе газотурбинного двигателя (ГТД) НК-14СТ-8 производства ОАО «Моторостроитель» (г. Самара, Россия), трехкаскадно-го центробежного компрессора (ЦК) и технологического оборудования конструкции ПАО.

Объект исследования

ТКУ для утилизации н.г. является многофункциональным энерготехнологическим комплексом, который может обеспечивать не только сбор, транспорт и осушку газа, но и отбор конденсата, а также производство тепла в процессе утилизации теплоты выхлопных газов в ГТД. Основными функциональными единицами ТКУ являются: система предварительной подготовки н.г. (СППГ), турбокомпрессорный агрегат (ТКА), оснащенный установкой утилизации теплоты выхлопных газов (УТВГ), и система низкотемпературной сепарации (СНТС) н.г. на основе использования дроссель-эффекта. Кроме того, в составе ТКУ имеется весьма сложный технологический контур, состоящий из элементов трубной обвязки и арматуры.

Структурная схема комплекса оборудования в составе КС Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения (НГКМ) представлена на рис. 1. Ее основными элементами являются: С1...С6 – сепаратор; СН – сепаратор низкотемпературный; АВО1...АВО3 – аппарат воздушного охлаждения; АТ – аппарат теплообменный; Др – дроссельное устройство; ГТД – газотурбинный двигатель; КНД – компрессор низкого давления; КВД1, КВД2 – 1-я и 2-я секции сжатия компрессора высокого давления.

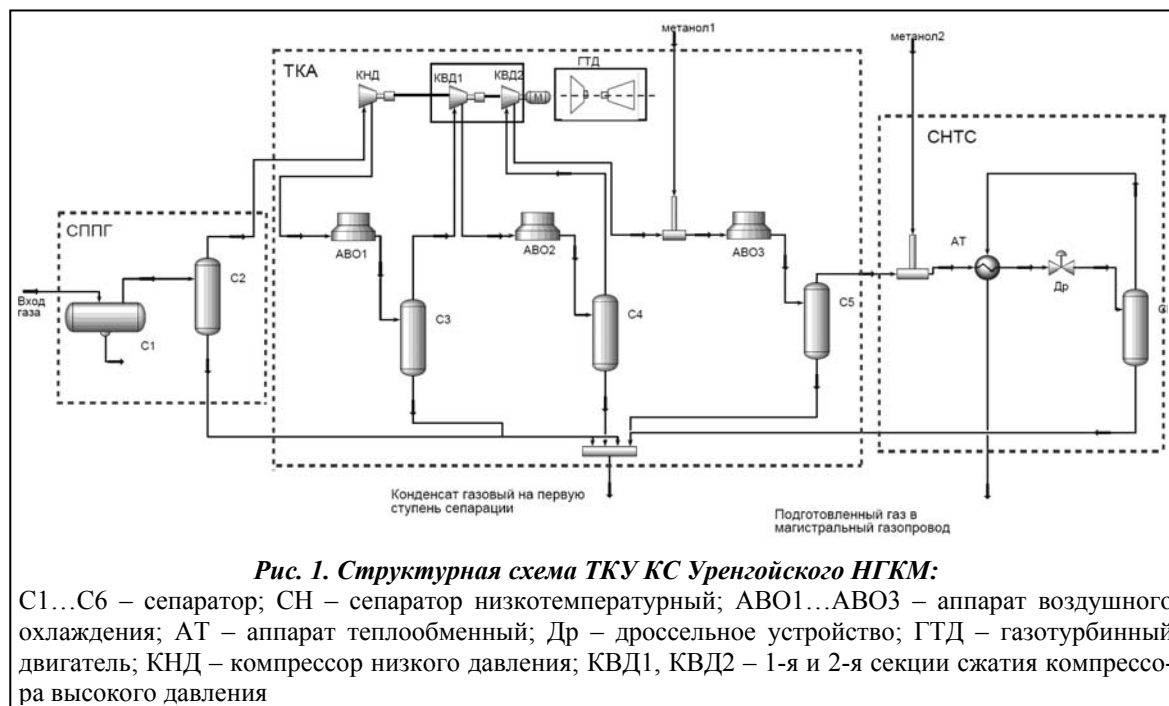


Рис. 1. Структурная схема ТКУ КС Уренгойского НГКМ:

С1...С6 – сепаратор; СН – сепаратор низкотемпературный; АВО1...АВО3 – аппарат воздушного охлаждения; АТ – аппарат теплообменный; Др – дроссельное устройство; ГТД – газотурбинный двигатель; КНД – компрессор низкого давления; КВД1, КВД2 – 1-я и 2-я секции сжатия компрессора высокого давления

Подготовку газа на входе в ТКУ обеспечивает СППГ, состоящая из двух ступеней очистки. Для реализации процесса компримирования н.г. в ТКУ применяется трехкаскадный ЦК в составе агрегата ТКА-Ц-8БД/0,3-8,16. При этом в составе каждого каскада сжатия компрессора (КСК) работает одна секция сжатия компрессора (ССК), система охлаждения, состоящая из аппаратов воздушного охлаждения (АВО), и система сепарации газа после каждого АВО (рис. 1).

Подготовка газа перед подачей его в магистральный газопровод (МГ) осуществляется в СНТС, созданной на основе использования дроссель-эффекта. Основные энерготехнологические параметры объекта, полученные на этапе технологического проектирования ТКУ, представлены в табл. 1.

Особенности работы технологической схемы и оборудования в составе ТКУ

При создании и термодинамическом анализе установки рассматриваются особенности рабочего процесса:

1. ТКУ является совокупностью технологических систем, реализующих основные этапы ее рабочего процесса.
2. В процессе эксплуатации ТКУ возможно изменение в широком диапазоне параметров н.г. на входе.
3. Система предварительной подготовки газа должна обеспечивать не только очистку, но и защиту технологического оборудования от залповых забросов жидкости на вход ТКУ.
4. Проектирование систем охлаждения и сепарации газа в ТКУ должно выполняться с учетом отвода теплоты конденсации углеводородного газа и необходимости обеспечения безгидратного режима работы технологического контура установки.
5. В связи с потребностью подготовки газа перед подачей его в МГ возникает необходимость анализа и учета зимнего и летнего режимов работы ТКУ, в т.ч. СНТС.

Таблица 1. Энерготехнологические параметры исследуемой установки

Наименование параметра	Значения		
	Проектные режимы		Фактический режим «зима»
	«лето»	«зима»	
коммерческая производительность на входе при стандартных условиях, млн.м ³ /сут ($T = 293 \text{ K}, p = 0,1013 \text{ МПа}$) массовая, кг/с,	1,141 10,4		1,199 11,01
давление газа: на входе КС (ТКУ), МПа на выходе КС (ТКУ), МПа	0,33..0,59 5,55 (8,44)	(0,3..0,56) 4,55 (8,16)	0,431 (0,401) 4,55 (7,58)
температура газа: на входе КС, К на выходе КС, К	279...290 293 285		272 291
температура точки росы газа на выходе КС: по воде, К по углеводородам, К	261 261	251 251	253 253
Энергетические показатели			
потребляемая мощность ТКА, кВт	7175	7753	7170
эффективный КПД ГТД	0,290	0,295	0,281
расход топливного газа, кг/с	0,513	0,545	0,529
потребляемая электрическая мощность ТКУ, кВт	412,5	202,5	225
тепловая мощность утилизатора тепла (при температуре теплоносителя 343/ 388 К), МВт	–	4	–

Некоторые особенности методики анализа и расчет эффективности блочно-комплектной ТКУ для КС Уренгойского НГКМ мощностью 8 МВт

Решение задачи анализа эффективности ТС блочно-комплектной ТКУ осуществляется в постановке прямой задачи термодинамики, т.е. определяется эффективность схемы установки, получаемой на этапе технологического проектирования [1].

На рис. 2 представлена схема потоков энергии блочно-комплектной ТКУ, к которым относятся: $G_{ТГ}$, $G_{ИВ}$ – энергия, подводимая с потоком топливного газа и импульсного воздуха; $N_{ТКА}^{ЭЛ}$, $N_{СППГ}^{ЭЛ}$, $N_{АВО}^{ЭЛ}$, $N_{СНТС}^{ЭЛ}$ – электрическая мощность, подводимая к потребителям ТКА, СППГ, АВО и СНТС соответственно; $Q_{УТВГ}$ – тепловая мощность, отводимая из утилизатора ТВГ; $Q_{ВЕНТ}$, $Q_{ОТВ}^{АВО}$ – тепло, отводимое за пределы установки с вентиляционными сбросами ТКА и воздухом на выходе АВО.

В ТС компрессорной установки происходят разнокачественные энергетические преобразования [1]. В связи с этим термодинамический анализ ТС выполняется на основе ис-

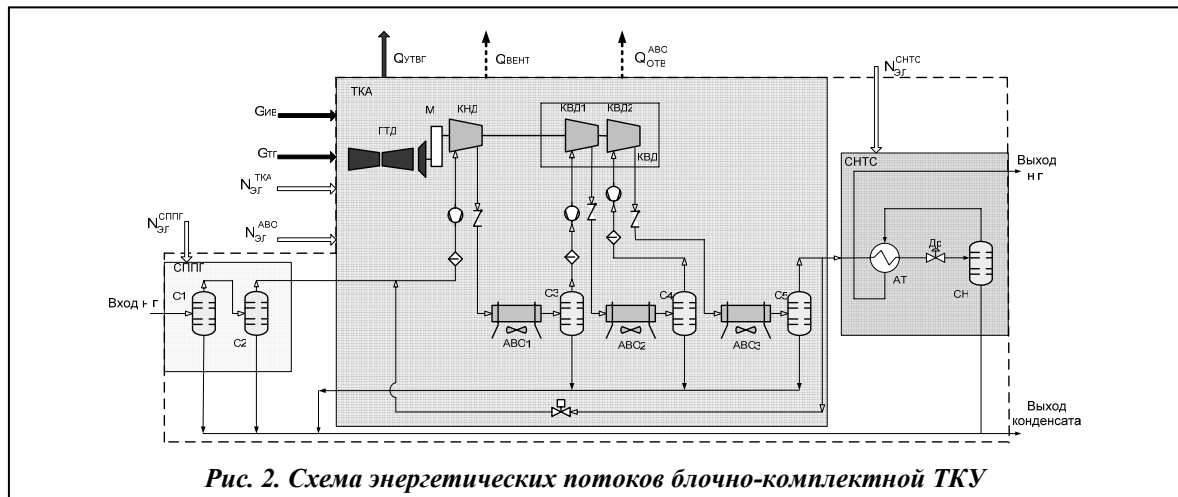


Рис. 2. Схема энергетических потоков блочно-комплектной ТКУ

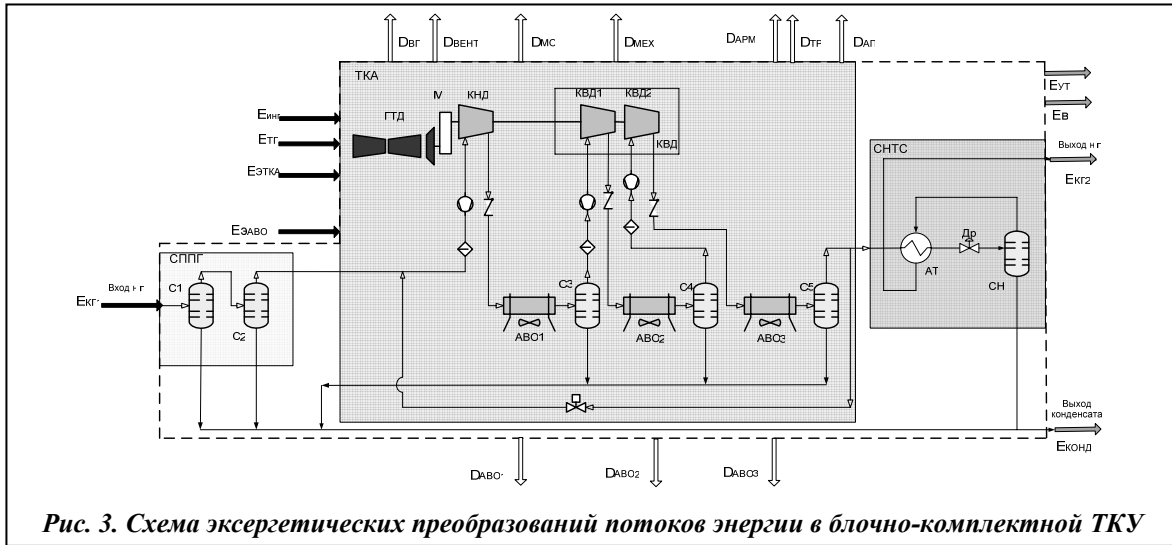


Рис. 3. Схема эксергетических преобразований потоков энергии в блочно-комплектной ТКУ

пользования общей меры работоспособности для всех видов энергии – эксергии. Эксергетический метод, базирующийся на первом и втором законах термодинамики, – наиболее универсальный метод термодинамического анализа сложной технической системы. Критерием эффективности системы при этом является, как известно, эксергетический КПД (η_{ex}^{TKU}) [2–7]. При этом величина η_{ex}^{TKU} определяется при условии обеспечения материального, мощностного и эксергетического балансов в ТКУ.

Схема эксергетических потоков и потерь эксергии для рассматриваемой ТС блочно-комплектной ТКУ н.г. представлена на рис. 3.

К установке подводятся следующие потоки эксергии: топливного газа (т.г.) – $E_{ТГ}$; компримируемого газа на входе – $E_{КГ1}$; электроэнергия для приводов вентиляторов АВО в системе охлаждения и электропотребителей ТКА соответственно – $E_{Э}^{АВО}$, $E_{Э}^{ТКА}$; эксергия ингибитора – $E_{инг}$. К полезно используемой эксергии относятся: эксергия компримируемого газа на выходе установки – $E_{КГ2}$; выделившегося конденсата – $E_{конд}$; утилизированной ТВГ двигателя – $E_{ут}$; сжатого воздуха, отведенного от ГТД агрегата, для нужд соседней ТКУ – $E_{в}$.

Потери эксергии (диссипация эксергии) представлены в виде $D_{ТВГ}$, $D_{вент}$, $D_{МО}$, $D_{мех}$, $D_{АВО1}$, $D_{АВО2}$, $D_{АВО3}$, $D_{ап}$, $D_{арм}$, $D_{тр}$ – потерь ТВГ двигателя, с вентиляционными выбросами из ТКА, с охлаждающим воздухом, отводимым от маслоохладителей (МО) и АВО; механических потерь в мультипликаторе (мех); потерь, связанных с наличием сопротивления в технологических аппаратах (ап), арматуре (арм) и трубопроводах (тр) технологического контура соответственно. Учет потерь в процессе эксергетического анализа установки осуществляется путем включения соответствующих эксергетических КПД в уравнения эксергетического баланса при анализе как отдельных подсистем, так и ТС в целом.

Исходные данные для проведения анализа эффективности ТКУ как при расчетных, так и фактических параметрах установки представлены выше в табл. 1.

Анализ эффективности ТКУ осуществлялся при ее работе на установившемся режиме с учетом ряда допущений и особенностей реального рабочего процесса:

- потоки эксергии, связанные с вводимым ингибитором, импульсным воздухом и подачей электроэнергии к СППГ и СНТС по причине их незначительного влияния на эксергетический и мощностной балансы ТКУ не учитываются;
- утилизатор ТВГ двигателя при фактическом режиме работы ТКА не используется.

Для каждого из режимов работы, представленных в табл. 1, анализ эффективности установки выполнен по следующим вариантам:

1. С учетом потоков эксергии только на входе и выходе из установки, т.е. по принципу «черного ящика». При этом расход т.г. в ГТП определен расчетным путем;

2. С определением эффективности отдельных подсистем, входящих в состав установки – СППГ, ТКА, СНТС.

Значения эксергии потоков определялись с использованием выражения для удельной эксергии компримируемого газа $e_{кг} = h_2 - h_{0C} - T_{0C} \cdot (s_2 - s_{0C})$ [4] и с учетом теплофизических характеристик реального газа.

При этом эксергетический КПД ТКУ по параметрам газа на входе и выходе определялся согласно выражению

$$\eta_{ex}^{TKV} = \frac{\Delta E_{кг}}{E_{ТГ} + \Sigma E_{\text{Э}}},$$

где $\Delta E_{кг}$ – изменение эксергии компримируемого газа; $E_{ТГ}$ – эксергия, подведенная к ГТД агрегата с потоком т.г.; $\Sigma E_{\text{Э}} = N_{\text{Э}} + \Sigma N_{\text{АВО}}$ – суммарный поток эксергии, подведенный в виде электрической мощности: $N_{\text{Э}}$ – мощность электропотребителей ТКА; $\Sigma N_{\text{АВО}}$ – мощность привода вентиляторов АВО.

Анализ эффективности ТКУ по второму варианту выполнен с использованием аналитической зависимости, позволяющей установить взаимосвязь между эксергетическими показателями эффективности установки и ее подсистем [7]

$$\eta_{ex}^{TKV} = \eta_{ex}^{TKA} * \beta_{TKA} - \left[(1 - \eta_{ex}^{СППГ}) \cdot \beta_{СППГ} + (1 - \eta_{ex}^{HTC}) \cdot \beta_{HTC} \right],$$

где η_{ex}^{TKA} , $\eta_{ex}^{СППГ}$, η_{ex}^{HTC} – эксергетические КПД ТКА, СППГ и СНТС соответственно;

$\beta = \frac{E_p}{E_{PC}}$ – доля располагаемой эксергии (E_p) соответствующей подсистемы установки к располагаемой эксергии всей анализируемой системы (E_{PC}).

Располагаемая эксергия установки (E_{PC}) определяется суммой располагаемой эксергии всех ее головных элементов. Головным элементом в данной установке является блочно-комплектный ТКА, к которому подводится суммарный внешний поток эксергии

$$E_{PC} = \Sigma N_{\text{ЭЛ}} + E_{ТГ},$$

где $\Sigma N_{\text{ЭЛ}}$ – электрическая мощность, подводимая к потребителям ТКУ; $E_{ТГ}$ – эксергия, подводимая с потоком топливного газа в ГТД.

Располагаемая эксергия неголовных элементов (E_p) установки рассматривается для каждого элемента отдельно.

В соответствии со структурной схемой ТКУ (рис. 1) и схемой эксергетических преобразований (рис. 3) рассмотрим методику определения эксергетического КПД каждого из функциональных элементов.

Коэффициент эффективности СППГ в эксергетических параметрах, связанный с наличием гидравлических потерь, определялся как

$$\eta_{ex}^{СППГ} = \frac{E_2}{E_1}, \quad (1)$$

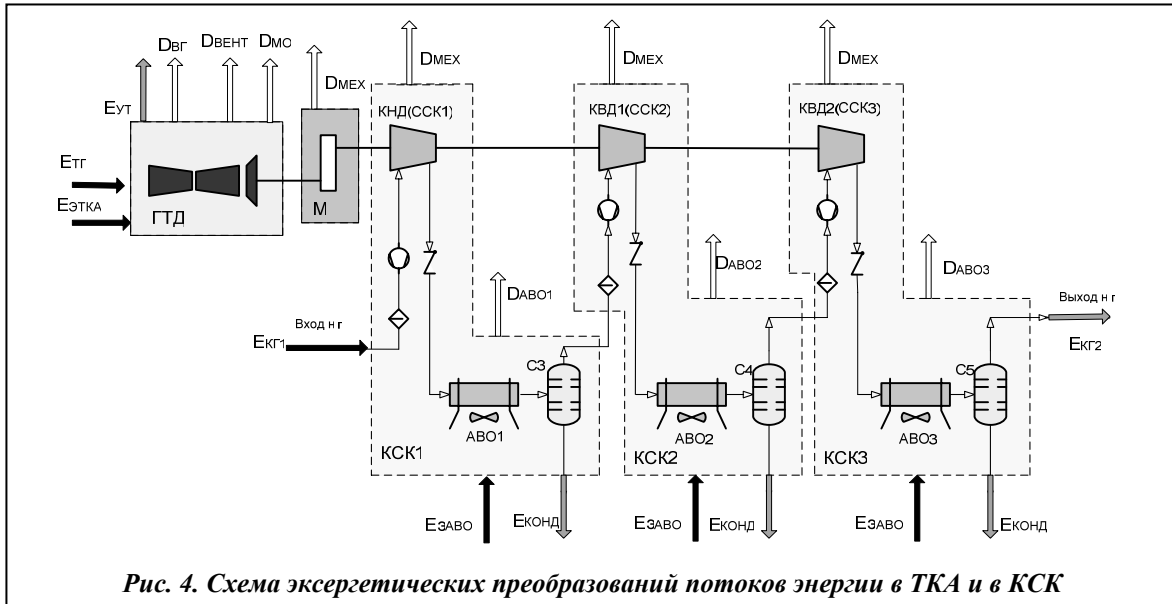
где E_1, E_2 – эксергия потока на входе и выходе системы соответственно.

Располагаемой эксергией СППГ является эксергия потока компримируемого газа на входе системы.

Эксергетический анализ эффективности ТКА осуществляется с учетом следующих условий и допущений:

1) Отборы части циклового воздуха ГТД на обогрев отсеков ТКА и периодическую защиту воздухоприемного тракта ГТД от обледенения, расход газа на технологические нужды (например, на турбодетандер во время запуска ГТД), а также отбор мощности в двигателе для привода его вспомогательных агрегатов не учитываются.

2) Внешние и внутренние потери в ГТП, вызванные потерями давления в воздухоприемном и выхлопном трактах привода, а также отводом ТВГ, учитываются эффективным КПД двигателя в составе агрегата.



3) Потоки эксергии углеводородного конденсата, выделяющегося в АВО, в связи с их незначительной величиной на фактическом режиме работы ТКА также не учитываются (выделение конденсата не превышает 0,04 кг/с).

Анализируя эффективность агрегата ТКА-Ц-8БД/0,3-8,16 (рис. 4), целесообразно выделить КСК в самостоятельные подсистемы и определять их КПД как отдельных функциональных единиц. Тогда выражение для КПД агрегата может быть записано как

$$\eta_{ex}^{ТКА} = \eta_{ex}^{ГТП} \beta_{ГТП} - \left[(1 - \eta_{ex}^M) \beta_M + \sum_{i=1}^n [(1 - \eta_{ex}^{КСК_i}) \beta_{КСК_i}] \right], \quad (2)$$

где $\eta_{ex}^{ГТП}$, η_{ex}^M , $\eta_{ex}^{КСК_i}$ – эксергетический КПД ГТП, мультипликатора и КСК; $\beta_{ГТП}$, β_M , $\beta_{КСК_i}$ – доля располагаемой эксергии ГТП, мультипликатора и КСК.

Эксергетический КПД ГТП ($\eta_{ex}^{ГТП}$) при условии, что низшая теплотворная способность с точностью до 2% соответствует химической эксергии т.г. [8], равняется эффективному КПД привода (η_e). Головным элементом ТКА является ГТП.

Эксергетический КПД мультипликатора М равен его механическому КПД и определяется из выражения

$$\eta_M = \frac{N_{ВЫХ}}{N_{ВХ}}, \quad (3)$$

где $N_{ВХ}$, $N_{ВЫХ}$ – мощность на ведущем (входном) и ведомом (выходном) валу мультипликатора соответственно.

Располагаемой эксергией М является механическая мощность силовой турбины ГТП. Аналогично (2) определяем КПД каскада сжатия

$$\eta_{ex}^{КСК_i} = \eta_{ex}^{КСК_i} \beta_{КСК_i} - (1 - \eta_{ex}^{АВО_i}) \beta_{АВО_i} - (1 - \eta_{ex}^{C_i}) \beta_{C_i}, \quad (4)$$

где $\eta_{ex}^{КСК_i}$, $\eta_{ex}^{АВО_i}$, $\eta_{ex}^{C_i}$ – эксергетический КПД ССК, АВО и сепаратора соответственно; $\beta_{КСК_i}$, $\beta_{АВО_i}$, β_{C_i} – располагаемая эксергия ССК, АВО и сепаратора соответственно.

Эксергетический КПД ССК определяется с учетом того, что в секции сжатия обеспечивается повышение параметров компримируемого газа за счет подвода части механической энергии привода. Поэтому КПД ССК можно представить как

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{ССК}_i} = \frac{E_2^{\text{ССК}_i} - E_1^{\text{ССК}_i}}{N_{\text{ССК}_i}}. \quad (5)$$

Доля располагаемой эксергии ССК как головного элемента подсистемы КСК определяется как

$$\beta_{\text{ССК}_i} = \frac{N_{\text{ССК}_i}}{N_{\text{ССК}_i}}. \quad (6)$$

Показатель эффективности АВО определен согласно [5] с учетом термодинамических параметров теплоносителя, окружающей среды, а также их гидравлического совершенства. Располагаемая эксергия на входе АВО состоит из эксергии потока компримируемого газа на выходе ССК_{*i*}, т.е. на входе АВО_{*i*} $E_2^{\text{ССК}_i}$. Доля располагаемой эксергии АВО определяется как

$$\beta_{\text{АВО}_i} = \frac{E_2^{\text{ССК}_i}}{N_{\text{ССК}_i}}. \quad (7)$$

Коэффициент эффективности сепаратора, связанный с наличием гидравлических потерь в аппарате, определялся аналогично выражению (1). Располагаемой эксергией является поток эксергии компримируемого газа на входе аппарата $E_1^{C_i}$. Доля располагаемой эксергии С определяется как

$$\beta_{C_i} = \frac{E_1^{C_i}}{N_{\text{ССК}_i}}. \quad (8)$$

Следует отметить, что в данной работе диссипацией эксергии в арматуре ($D_{\text{АРМ}}$) и отдельных элементах трубопроводов ($D_{\text{ТР}}$), соединяющих функциональные элементы ТКУ, согласно [5] можем пренебречь.

Эксергетический КПД системы НТС определялся как

$$\eta_{\text{ex}}^{\text{НТС}} = \frac{E_{\text{ВЫХ}}^{\text{НТС}} + E_{\text{КОНД}}}{E_{\text{ВХ}}^{\text{НТС}}},$$

где $E_{\text{ВХ}}^{\text{НТС}}$, $E_{\text{ВЫХ}}^{\text{НТС}}$ – эксергия потоков газа на входе и выходе системы НТС соответственно; $E_{\text{КОНД}}$ – эксергия потока конденсата, выделившегося при работе системы НТС.

Эксергия конденсата оценивается как поток эксергии, подводимый для сжижения конденсата в обратимом процессе [6]

$$E_{\text{КОНД}} = G_{\text{КОНД}} \cdot r_{\text{КОНД}} \cdot \frac{T_{\text{ср.к}} - T_0}{T_{\text{ср.к}}},$$

где $G_{\text{КОНД}}$ – массовый выход конденсата в системе НТС; $r_{\text{КОНД}}$ – средняя теплота конденсации углеводородной смеси; $T_{\text{ср.к}}$ – средняя температура конденсации углеводородов; T_0 – температура окружающей среды.

С использованием (2)–(8) результаты расчета эффективности каждого каскада сжатия КСК1...КСК3 и всего ТКА для фактического режима работы представлены в табл. 2.

Поскольку на вход ЦК установки как дожимной машины подается газ высокого давления для таких элементов КСК, как АВО и С, доля располагаемой эксергии $\beta > 1$. В связи с этим величина эксергии компримируемого газа на входе в АВО и С превышает значение внешней эксергии, подводимой к каждому КСК.

Интегральные результаты расчетного анализа эффективности ТС установки при проектных и фактических режимах работы представлены в табл. 3.

Таблица 2. Показатели эффективности элементов ТС и эксергетического КПД ТКА

Наименование параметра	Значения										
	ГТП	М	КСК1 (КНД)			КСК2 (КВД1)			КСК3 (КВД2)		
			ССК	АВО	С	ССК	АВО	С	ССК	АВО	С
КСК											
β	–	–	1	1,462	1,177	1	2,287	1,87	1	2,855	2,449
η_{ex}	–	–	0,842	0,805	0,98	0,927	0,818	0,991	0,816	0,858	0,999
$\eta_{ex}^{КСК}$	–	–	0,533			0,492			0,408		
ТКА											
β	1	0,279	0,105			0,09			0,082		
η_{ex}	0,279	0,98	0,533			0,492			0,408		
$\eta_{ex}^{ТКА}$	0,131										

Таблица 3. Показатели эффективности элементов ТС и эксергетического КПД ТКУ

Наименование элемента		Проектный режим «лето»		Проектный режим «зима»		Фактический режим «зима»	
		Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 1	Вариант 2
СППГ	$\beta_{СППГ}$	–	0,074	–	0,049	–	0,065
	$\eta_{ex}^{СППГ}$	–	0,939	–	0,996	–	0,979
ТКА	$\beta_{ТКА}$	–	1	–	1	–	1
	$\eta_{ex}^{ТКА}$	–	0,167*	–	0,192*	–	0,135*
НТС	$\beta_{НТС}$	–	0,237	–	0,186	–	0,198
	$\eta_{ex}^{НТС}$	–	0,894	–	0,85	–	0,861
эксергетический КПД установки		0,137	0,137 (0,140**)	0,163	0,163 (0,163**)	0,106	0,106 (0,113**)

* – эксергетический КПД ТКА, определяемый методом «черного ящика»;

** – значения КПД, полученные умножением значений эксергетического КПД отдельных систем.

Эффективность СППГ зависит от параметров компримируемого газа на входе системы и величины ее гидравлического сопротивления. Значение эффективности и доля располагаемой эксергии находятся в интервале значений 0,939...0,996 и 0,049...0,074 соответственно.

Для ТКА КС Уренгойского НКМ анализ результатов, полученных двумя способами (см. табл. 2 и 3), показывает достаточную для инженерных расчетов сходимость результатов. Отличие значений $\eta_{ex}^{ТКА}$, определяемых поэлементно и методом «черного ящика», достигает 3%. Эксергетический КПД ТКА для фактического зимнего режима работы имеет значения 0,131 и 0,135 и зависит от эффективности всех функциональных элементов и в первую очередь ГТД и ЦК.

Для системы НТС значение $\eta_{ex}^{НТС}$ находится в диапазоне 0,85...0,894 и зависит от величины перепада давления газа на дроссельном устройстве.

Расчетная эффективность ТС установки, полученная при технологическом проектировании, находится в диапазоне значений эксергетического КПД 0,137...0,163 для летнего и зимнего режимов работы соответственно. Большее значение КПД для проектного зимнего режима обусловлено использованием утилизатора тепла тепловой мощностью 4 МВт. Значения КПД, полученные для каждого из анализируемых режимов как по варианту 1, так и по варианту 2, одинаковы.

В результате выполненной работы получены следующие данные об эффективности ТКУ, применяемой на КС Уренгойского НГКМ:

1. Расчетное значение эксергетического КПД блочно-комплектной ТКУ КС Уренгойского НГКМ находится в диапазоне 0,137...0,163 в зависимости от режимов работы в зимний и летний периоды. Значение эксергетического КПД установки для зимнего режима работы без УТВГ, установленного по фактическим параметрам, составляет 0,106.

2. Термодинамическая эффективность основных функциональных элементов ТКУ составляет $\eta_{\text{ex}}^{\text{СППГ}} = 0,939 \div 0,996$; $\eta_{\text{ex}}^{\text{ТКА}} = 0,135 \div 0,192$; $\eta_{\text{ex}}^{\text{НТС}} = 0,85 \div 0,894$.

3. Принципы и подходы, изложенные в данной работе, могут быть использованы в дальнейшем для создания инженерной методики расчета эффективности технологических схем ТКУ с учетом различных условий эксплуатации установок нефтяной и газовой промышленности.

Литература

1. *Парафейник В. П.* Научные основы совершенствования турбокомпрессорных установок с газотурбинным приводом: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Харьков, 2009. – 41 с.
2. *Бродянский В. М.* Эксергетический метод и его приложения / В. М. Бродянский, В. Фратшер, К. Михалек. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 288 с.
3. *Соколов Е. Я.* Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения: Учеб. пособие для вузов – 2-е изд., перераб. / Е. Я. Соколов, В. М. Бродянский. – М.: Энергоиздат, 1981. – 320 с.
4. *Шаргут Я.* Эксергия / Я. Шаргут, Р. Петела. – М.: Энергия, 1968. – 280 с.
5. *Прилипко С. А.* Анализ эффективности блочно-комплектной турбокомпрессорной установки природного газа с газотурбинным приводом / С. А. Прилипко, В. П. Парафейник, И. Н. Тертышный // Техн. газы. – 2012. – № 4. – С. 39–47.
6. *Язык А. В.* Системы и средства охлаждения природного газа / А. В. Язык. – М.: Недра, 1986. – 200 с.
7. *Андреев Л. П.* Обобщенное уравнение связи К.П.Д. энергоиспользующей системы и К.П.Д. ее элементов / Л. П. Андреев // Изв. вузов. Энергетика. – 1982. – № 3. – С. 77–82.
8. *Степанов В. С.* Расчет химической эксергии и эксергии технических топлив / В. С. Степанов, Т. Б. Степанова // Энергетика: Изв. РАН. – 1994. – № 1. – С. 106–115.

Поступила в редакцию
29.09.12

УДК 001.891:65.011.56

М. С. Овчаренко

Сумський державний університет
(e-mail: miklovcharenko@gmail.com)

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ РОТОРНО-ДИНАМІЧНОГО АГРЕГАТУ ГОМОГЕНІЗАТОРА

Проаналізовані причини, що не дозволяють використовувати існуючі роторні агрегати – гомогенізатори для технологічних процесів з високими вимогами до дисперсності робочого середовища. Запропоновано спосіб розв'язання проблеми. Створено дослідний зразок роторно-динамічного агрегату гомогенізатора (РДАГ), що дозволив знайти залежності між конструктивними параметрами робочих органів та гідродинамічними ефектами в проточній частині. Проведено параметричні випробування різних конфігурацій проточних частин РДАГ.

Проанализированы причины, не позволяющие использовать существующие роторные агрегаты – гомогенизаторы для технологических процессов с высокими требованиями к дисперсности рабочей среды. Предложен способ решения проблемы. Создан опытный образец роторно-динамического агрегата гомогенизатора (РДАГ), который позволил найти зависимости между конструктивными параметрами рабочих органов и гидро-