

ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭНЕРГОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ ЭТУ-1

Инж. ПАНТЕЛЕЙ Н. В.

Белорусский национальный технический университет

Ключевыми характеристиками ЭТУ-1 [1, 2] являются поверхности нагрева указанных теплообменных аппаратов, принимаемые в них значения температурных напоров, применяемые материалы, компоновочные решения и т. д. Наличие температурных характеристик рабочего тела (РТ) ЭТУ-1 по всему тракту ее технологического цикла – ключевой момент при принятии таких решений. Кроме того, они обеспечат законченность на принятом этапе исследований характеристик ЭТУ-1. Для иллюстрации результатов расчетных исследований температурных характеристик ЭТУ-1 ограничимся двумя характерными точками технологического процесса ЭТУ-1: его начальной и конечной точками. В начальной точке таким значением является температура РТ за газовой турбиной, а в конечной – значение температуры азота за турбодетандером (ТД).

Температурные характеристики рабочего тела энерготехнологической установки ЭТУ-1. Одна из характеристик ЭТУ-1 – значение температуры рабочего тела за газовой турбиной. Выполненные расчеты позволяют в полном объеме решать поставленные задачи. В пределах принятых граничных условий получены температурные характеристики РТ ЭТУ-1 во всех элементах ее технологической схемы. Одной из них является температура РТ за газовой турбиной. В табл. 1 представлены значения температур для различных значений КПД газовой турбины, ее компрессора и турбодетандера.

Таблица 1

Значения температуры рабочего тела $t_k^{ГТ}$ за газовой турбиной ЭТУ-1

Значения давлений РТ перед и за турбиной		Значения КПД составляющих ЭТУ-1 машин (газовой турбины, ее компрессора и турбодетандера)		
p_n	p_p	85 %	90 %	94 %
15	6	1122,91	1106,41	1093,18
20		1046,52	1025,37	1008,41
25		990,45	965,85	946,12
30		946,62	919,3	897,37
15	7	1165,83	1151,91	1053,19
20		1086,87	1068,17	1053,19
25		1028,9	1006,66	988,84
30		983,57	958,54	938,47
15	8	1204,17	1192,55	1183,25
20		1122,91	1106,41	1093,18
25		1063,25	1043,12	1026,98
30		1016,59	993,6	975,17
15	10	1270,72	1263,07	1256,95
20		1185,5	1172,77	1162,57
25		1122,91	1106,41	1093,18
30		1073,95	1054,47	1038,86

Монотонное убывание конечной температуры с ростом начального давления при фиксированном значении начальной температуры обусловлено смещением влево процесса расширения в TS-координатах. При этом меньшим значениям КПД составляющих ЭТУ-1 элементов соответствуют большие значения этой температуры при прочих равных условиях.

На настоящий момент в технологической цепочке ЭТУ-1 получены в качестве технологических продуктов (ТП) вода, сублимированная углекислота, а также тепловая и механическая (электрическая) энергии. Азот завершает эту цепочку. Причем азот и углекислота, являясь завершающими ТП этой цепочки, обеспечивают получение еще одного ценнейшего вида энергии – холодоэнергии. Одна ее часть расходуется на внутреннее потребление в технологическом процессе ЭТУ-1 для глубокого охлаждения воздуха в воздухоохладителе. Это продиктовано необходимостью уменьшения работы сжатия в компрессоре. Вторая часть холодоэнергии также идет на внутреннее потребление ЭТУ-1. Она расходуется на охлаждение РТ перед турбодетандером. Что, в свою очередь, продиктовано необходимостью поддержания температуры РТ перед ТД, обеспечивающей переход углекислоты в сублимированное состояние. И только третья остаточная часть азота является свободным ТП как холодоагент для внешнего ее потребления. Ее наличие – косвенное подтверждение работоспособности самой установки, равно как и значение температуры (табл. 2). Это значение изменяется в узком диапазоне: от -126 до -134 °С, что, вполне очевидно, благоприятным образом сказывается на регулировочных характеристиках ЭТУ-1. Таким образом, работоспособность ЭТУ-1 подтверждается этими значениями, и она не вызывает сомнений.

Таблица 2

Значения температур рабочего тела t_k^{TD} за второй ступенью турбодетандера при начальной температуре цикла ЭТУ-1 $t = 1400$ °С

Значения давлений РТ перед и за турбиной		Значения КПД составляющих ЭТУ-1 машин (газовой турбины, ее компрессора и турбодетандера)		
p_n	p_p	85 %	90 %	94 %
15	6	-125,91	-129,94	-133,18
20		-125,78	-129,8	-133,03
25		-125,69	-129,7	-132,86
30		-125,62	-129,62	-132,77
15	7	-125,99	-130,02	-133,27
20		-125,86	-129,88	-133,11
25		-125,76	-129,77	-132,99
30		-125,68	-129,69	-132,84
15	8	-126,04	-130,1	-133,32
20		-125,9	-129,95	-133,15
25		-125,8	-129,84	-133,04
30		-125,72	-129,75	-132,94
15	10	-126,16	-130,26	-133,49
20		-126,01	-130,03	-133,32
25		-125,9	-129,91	-133,19
30		-125,82	-129,82	-133,03

Технологический цикл ЭТУ-1 может быть построен таким образом, что температура азота за ТД может быть доведена до уровня немногим ниже – 180 °С. Это обеспечит получение жидкого азота. Последнее обстоятельство дополнительно расширит функциональные возможности ЭТУ-1. Однако такое граничное условие на данном этапе характеристик данной установки не составляло предмета исследований.

Энергетические характеристики. Практический интерес представляют численные значения электрического КПД ЭТУ-1 для широкого диапазона изменения ее граничных условий [1, 2]. Их значения при начальной температуре $t_n^{ГТ} = 1400$ °С приведены в табл. 3.

Таблица 3

Численные значения электрического КПД ЭТУ-1 для широкого диапазона изменения ее граничных условий при $t_n^{ГТ} = 1400$ °С

Начальное давление, бар	Разделительное давление, бар	КПД элементов 85 %	КПД элементов 90 %	КПД элементов 94 %
15	6	26,43	36,76	43,89
20		30,41	39,9	46,45
25		31,43	40,62	46,98
30		31,45	40,53	46,8
35		31,03	40,08	46,34
40		30,4	39,47	45,74
45		29,68	38,79	45,09
50		28,9	38,08	44,41
15	7	16,41	28,51	36,88
20		23,87	34,52	41,88
25		26,33	36,42	43,39
30		27,12	36,96	43,76
35		27,19	36,92	43,64
40		26,91	36,52	43,28
45		26,44	36,11	42,81
50		25,86	35,56	42,26
20	8	16,51	28,47	36,74
25		20,83	31,19	39,55
30		22,57	33,22	40,58
35		23,23	33,66	40,87
40		23,34	33,66	40,79
45		23,16	33,42	40,51
50		22,8	33,05	40,12
25	10	8,15	21,52	30,75
30		12,56	25,02	33,64
35		14,76	26,72	34,98
40		15,87	27,53	35,59
45		16,39	27,87	35,8
50		16,55	27,92	35,78

Очень важной энергетической характеристикой ЭТУ-1 является количество тепловой энергии, подводимой в ее цикле $Q^{\text{ЭТУ-1}}$. Характер кривых

данной зависимости идентичен таковому для мощности ЭТУ-1, т. е. монотонное нарастание величины $Q^{\text{ЭТУ-1}}$ при повышении начального давления цикла. Численные значения $Q^{\text{ЭТУ-1}}$ связывают мощность и электрический КПД энерготехнологической установки ЭТУ-1.

При анализе эффективности теплоэнергетических установок часто применяется коэффициент использования энергии топлива (КИТ), или коэффициент преобразования теплоты топлива. Это очередная энергетическая характеристика ЭТУ-1 [3]. Для нее КИТ монотонно убывает по мере роста начального давления в диапазоне 10–50 бар. Его численные значения составляют 60–30 % для теоретических условий и оговоренных выше граничных условий. Максимум КИТ лежит за пределами работоспособности ЭТУ-1. Тем не менее его абсолютные значения в рабочей зоне достаточно хорошо согласуются с электрическим КПД установки (табл. 4).

Таблица 4

**Значения КИТ ЭТУ-1 для широкого диапазона изменения
ее граничных условий при $t_{\text{н}}^{\text{ГТ}} = 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$**

Начальное давление, бар	Разделительное давление, бар	КПД элементов 85 %	КПД элементов 90 %	КПД элементов 94 %
15	6	47,26	54,66	59,7
20		43,6	50,63	55,45
25		40,88	47,84	52,62
30		38,66	45,64	50,44
15	7	44,2	52,81	58,7
20		41,03	48,89	54,27
25		38,59	46,21	51,43
30		36,54	44,09	49,28
15		40,39	50,54	57,5
20		38,13	46,93	52,97
25		36,11	44,45	50,18
30		34,32	42,47	48,07
15	10	28,85	43,75	54
20		30,93	42,13	49,8
25		30,43	40,46	47,33
30		29,43	38,94	45,46

Замыкающей энергетической характеристикой ЭТУ-1 является эксергетический КПД. Результаты его расчетов для режима, соответствующего значению начальной температуры цикла в $1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$, и означенных выше граничных условий сведены в табл. 5.

Анализ результатов расчетов величин эксергетического КПД ЭТУ-1 подтверждает ее высокую эффективность. Его численные значения достигают на ряде режимов 60 % и более, что существенно выше, чем для применяемых в настоящее время паротурбинных установок ТЭС. Это еще раз подтверждает большую перспективность комбинированных энерготехнологических установок типа ЭТУ.

Таблица 5

**Значения эксергетического КПД ЭТУ-1 для широкого диапазона изменения
ее граничных условий при $t_{\text{н}}^{\text{ГТ}} = 1400 \text{ }^{\circ}\text{C}$**

Начальное давление, бар	Разделительное давление, бар	КПД элементов 85 %	КПД элементов 90 %	КПД элементов 94 %
15	6	48,3	55,0	59,65
20		43,79	50,14	54,52
25		40,78	47,02	51,34
30		38,45	44,69	48,99
15	7	46,58	54,54	60,0
20		42,1	49,29	54,23
25		39,16	46,07	50,85
30		36,89	43,72	48,4
15	8	44,82	54,32	60,88
20		40,40	48,53	54,17
25		37,58	45,23	50,51
30		35,41	42,84	47,95
15	10	40,39	54,74	64,74
20		36,79	47,42	54,72
25		34,45	43,82	50,33
30		32,56	41,4	47,79

Расходные характеристики ЭТУ-1. Рабочим телом ЭТУ-1 являются продукты сгорания органических топлив (ПСТ), состоящие преимущественно (98–99 %) из нагретого воздуха и по массе – воздух плюс топливо (2–1,5 %) [1, 2]. По этой причине ГТУ в первом приближении рассчитывают по воздуху. Основной силовой машиной ЭТУ-1 также является газовая турбина. Тем не менее расчет характеристик энергоустановки выполнялся с учетом фактического состава ПСТ по специально написанной программе. В качестве топлива принят природный газ с теплотворной способностью 33352,4 кДж/кг, используемый в Республике Беларусь. Количество топлива, сжигаемого в камере сгорания ЭТУ-1 при фиксированной начальной температуре цикла, напрямую зависит от начального давления перед газовой турбиной. С ростом величины этого давления увеличивается площадь цикла в TS-координатах, что в соответствии с законом сохранения энергии приводит к соответствующему увеличению подвода теплоты в цикле ЭТУ-1, а следовательно, – к увеличению расхода топлива установкой. Избыток воздуха в ПСТ соответствующим образом уменьшается с ростом давления (табл. 6).

Приведенные выше данные по расходам топлива и составу ПСТ, в основу расчета состава которых положено значение коэффициента $\beta_{\text{Г}}$, мало изменяются по технологической схеме ЭТУ-1, так как основу РТ ЭТУ-1, равно как и ГТУ, составляет нагретый воздух.

Отметим, что комбинированная энерготехнологическая установка ЭТУ-1 предназначена для целевого получения из ПСТ важных технологических продуктов (ТП). Первым таким продуктом в ее технологической цепочке является вода, входящая в состав ПСТ как результат окисления водорода топлива кислородом воздуха. Вывод воды из состава ПСТ осуществляется

естественным образом за счет перевода ее в жидкое состояние путем соответствующего охлаждения РТ. Конденсация водяных паров позволяет сохранить в цикле установки их скрытую теплоту парообразования, что означает использование высшей теплоты сгорания топлива в ЭТУ-1.

Таблица 6

Численные значения избытка воздуха в ПСТ ЭТУ-1
для широкого диапазона изменения ее граничных условий при $t_n^{ГТ} = 1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

Начальное давление, бар	Разделительное давление, бар	КПД элементов 85 %	КПД элементов 90 %	КПД элементов 94 %
10	6	12,554	11,893	11,413
15		7,5	7,095	6,801
20		5,934	5,611	5,377
25		5,149	4,867	4,663
30		4,668	4,411	4,226
10	7	17,266	16,378	15,73
15		8,81	8,337	7,994
20		6,669	6,307	6,044
25		5,662	5,353	5,129
30		5,067	4,789	4,588
10	8	25,991	24,712	23,776
15		10,443	9,887	9,483
20		7,5	7,095	6,801
25		6,218	5,88	5,635
30		5,487	5,187	4,97
15	10	15,413	14,613	14,031
20		9,578	9,066	8,694
25		7,5	7,095	6,801
30		6,414	6,066	5,813

Это является одним из факторов, объясняющих достаточно высокую тепловую эффективность установки. Очередным этапом исследований является количественное определение выхода воды в широком диапазоне граничных условий ЭТУ-1. Отдельные результаты такого определения приведены ниже.

Дальнейшие расчеты расходных характеристик ЭТУ-1 выполнялись по цепочке «сверху вниз» по ходу ее технологического процесса, начиная от газовой турбины. Первым элементом в этой цепочке является теплофикационная установка (ТУ), в которой происходит охлаждение ПСТ ниже точки росы водяных паров после предварительного снижения температуры РТ в регенераторе (Р) ЭТУ-1. В результате такого охлаждения ПСТ в ТУ водяные пары переходят в жидкое состояние и выводятся из состава РТ (ПСТ) в сепараторе воды (СВ). Количество выделяемой воды определяется количеством сожженного в КС топлива. Этим объясняется рост количества выделяемой воды при повышении начального давления цикла ЭТУ-1.

Вывод воды из состава РТ, в свою очередь, предопределяет необходимость корректировки состава ПСТ как по качественному их показателю β , так и по остаточному количеству. Количество воды монотонно возрастает от 2 до 4,5 кг/с с ростом начального давления цикла ЭТУ-1 в пределах 10–30 бар.

Вторым технологическим продуктом, выделяемым из ПСТ в технологической схеме ЭТУ-1, является углекислота, или диоксид углерода. Своему наличию в составе ПСТ он обязан, как известно, окислению кислородом воздуха углерода органического топлива при сжигании последнего. Применяемые на настоящее время технологии получения углекислоты, строящиеся на адсорбционных методах, отличаются сравнительно низкой эффективностью. Повысить эффективность получения углекислоты, очевидно, позволит ЭТУ-1. Это обусловлено объединением в одну технологическую цепочку ряда технологий получения ТП из состава ПСТ путем использования в ее технологической схеме достаточно простых, следовательно, малоэнергоемких, естественных достаточно хорошо отработанных технологических процессов. В частности, для вывода углекислоты используется обычная ее сепарация в сепараторе углекислоты (СУ) в сублимированном (твердом) состоянии. Для перевода ее в такое состояние используется охлаждение ее до температуры $-57\text{ }^{\circ}\text{C}$ при давлении 5,28 бара. Такое охлаждение обеспечивается в турбодетандере (ТД) ЭТУ-1, точнее – в первой его ступени, что накладывает соответствующие граничные условия на значения параметров ПСТ на входе в ТД.

Азот является третьим в технологической цепочке комбинированного производства ТП из ПСТ. Его получение носит остаточный принцип, так как после вывода из состава ПСТ углекислоты азот составляет их основу. Кроме того, низкое значение его температуры гарантирует получение четвертого технологического продукта – хладоэнергии, которая используется как для внутреннего потребления в технологической схеме ЭТУ-1, так и для внешнего – в качестве ТП.

Первый (первичный) поток охлажденного во второй ступени расширения ТД азота направляется при температуре порядка $-(125-133)\text{ }^{\circ}\text{C}$ на охлаждение воздуха в ОВ на входе в компрессор (К) ЭТУ-1. Так как температура воздуха перед К ограничена значением $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, то, очевидно, при фиксированном значении расхода воздуха в 100 кг/с расход первичного азота может быть определен из теплового баланса ОВ. А его расход будет функцией только температуры за второй ступенью ТД, которая, в свою очередь, изменяется в небольших пределах $-(125-133)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Этим и объясняется пологость характеристик зависимости расхода первичного азота от начального давления цикла ЭТУ-1 при фиксированном значении начальной температуры для одного значения разделительного давления. Величина потока первичного азота монотонно убывает с ростом начального давления в пределах 10–30 бар от 18–21 до 17,3–20,5 кг/с при том же фиксированном значении начальной температуры $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ для назначенного разделительного давления 7 бар.

Второй (вторичный) поток азота в технологической схеме ЭТУ-1 используется для доохлаждения ПСТ на входе в первую ступень ТД в охладителе газов (ОГ). Его количество, в свою очередь, определяется как количеством ПСТ, в состав которых входят газообразные углекислота и азот, так как (вода удалена в СВ перед ТД), так и температурой азота за второй ступенью ТД $-(125 - 133)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Количество вторичного азота определялось из теплового баланса ОГ. Величина его потока монотонно убывает с ростом начального давления в пределах 10–30 бар от 56–60 до 54–58 кг/с при

том же фиксированном значении начальной температуры 1400 °С для назначенного значения разделительного давления 7 бар.

Третий (третичный) поток азота является остаточным после второй ступени ТД. Его наличие – гарантия работоспособности ЭТУ-1, по меньшей мере, в рассмотренном диапазоне ее граничных условий, так как при необходимости он может быть использован для восполнения потоков первичного и вторичного азота. Такая необходимость может возникнуть, например, при изменении граничных условий для ЭТУ-1. В расчетах ее характеристик принималась постоянная величина температурных напоров в ОГ и ОВ на уровне 5 °С. Тем не менее запас по третичному азоту достаточен. Величина потока третичного азота монотонно убывает с ростом начального давления в пределах 10–30 бар от 19,3–20,4 до 18,6–19,6 кг/с при том же фиксированном значении начальной температуры 1400 °С для назначенного разделительного давления 7 бар.

Суммарное количество получаемого азота для приведенных выше граничных условий, найденное суммированием всех трех его потоков, приведено в табл. 7.

Таблица 7

Суммарное количество азота, получаемого в технологической схеме ЭТУ-1, для широкого диапазона изменения ее граничных условий при $t_n^{ГТ} = 1400\text{ °С}$

Начальное давление, бар	Разделительное давление, бар	КПД элементов 85 %	КПД элементов 90 %	КПД элементов 94 %
10	6	96,96	96,86	96,78
15		94,97	94,76	94,59
20		94,97	94,76	94,59
25		94,4	94,16	93,96
30		93,96	93,69	93,48
10		97,46	97,39	97,33
15		96,2	96,05	95,94
20		95,38	95,19	95,04
25		94,79	94,57	94,39
30		94,33	94,08	93,88
10	8	97,9	97,86	97,82
15		96,6	96,48	96,38
20		95,75	95,58	95,45
25		95,14	94,94	94,77
30		94,67	94,44	94,25
15	10	97,3	97,22	97,15
20		96,4	96,27	96,16
25		95,75	95,58	95,45
30		95,25	95,05	94,89

При обработке данных было принято решение учитывать хладоэнергию, носителем которой является только третичный азот. Хотя справедливости ради отметим, что такая энергия может быть учтена не только по от-

работавшим потокам первичного и вторичного азота после выхода их соответственно с ОГ с температурой $-(0,23 - 1,19) ^\circ\text{C}$ и с ОВ с температурой $-5 ^\circ\text{C}$, но и в качестве теплоты сублимации, получаемой в технологической схеме твердой углекислоты. Количество хладоэнергии слабо зависит от величины начального давления, изменяясь от 2500 до 3100 кВт в диапазоне изменения начального давления от 10 до 30 бар и начальной температуре $1400 ^\circ\text{C}$.

Также была оценена удельная выработка хладоэнергии ЭТУ-1 за отопительный период, которая представлена в табл. 8.

Таблица 8

Удельная выработка хладоэнергии ЭТУ-1 за отопительный период для широкого диапазона изменения ее граничных условий (МВт·ч/г)

КПД элементов, %	$p_p = 10$ бар				$p_p = 8$ бар				$p_p = 7$ бар			
	Начальное давление, бар				Начальное давление, бар				Начальное давление, бар			
	15	20	25	30	15	20	25	30	15	20	25	30
85	14,1	14,2	14,3	14,4	12,6	12,7	12,7	12,8	12,3	12,3	12,4	12,4
90	16,5	16,6	16,6	16,7	14,4	14,5	14,5	14,6	13,9	13,9	14	14
94	18,4	18,5	18,5	18,6	15,9	16	16	16	15,2	15,2	15,3	15,3

Вполне очевидно, что при других вариантах развития технологической цепочки ЭТУ и иных граничных условиях выход хладоэнергии качественно и количественно изменится.

Тепловая энергия в технологической схеме ЭТУ-1 отводится из теплофикационной установки (ТУ). Ее количество и потенциал, в общем случае, определяются целым комплексом режимных и конструктивных параметров установки, основными являются начальные параметры цикла ЭТУ-1, которые наряду с разделительным давлением определяют температуру ПСТ на входе в ее ТУ. Величина теплосъема в ТУ ЭТУ-1 определяется и температурой теплоносителя, подаваемого в ТУ для охлаждения ПСТ. Если иметь в виду теплоноситель существующих систем теплоснабжения – сетевую воду, то, очевидно, при фиксированном верхнем уровне параметров ПСТ на входе в ТУ количество получаемой в технологической схеме ЭТУ-1 тепловой энергии будет определяться выбранным температурным графиком тепловой сети, коэффициентом теплофикации, температурой наружного воздуха и рядом других сопутствующих варьируемых параметров. С учетом изложенного выше для иллюстрации технических возможностей ЭТУ-1 принято решение представлять в виде наиболее представительных ее характеристик. Результаты расчетов величин отпуска теплоты ЭТУ-1, соответствующие максимуму ее электрического КПД в диапазоне изменения начального давления от 10 до 30 бар и начальной температуре $1400 ^\circ\text{C}$, представлены в табл. 9.

Анализ табл. 9 показывает, что максимум отпуска тепловой энергии как ТП ЭТУ-1 соответствует значениям начального давления порядка 15 бар для всех принятых граничных условий. Кроме того, в пределах начального давления от 15 до 30 бар изменение величины удельной выработки тепловой энергии ЭТУ-1 меняется в узких пределах 20–25 %. Последнее обстоя-

тельство наряду с пологостью зависимости электрического КПД установки имеет большое значение в форсировочном плане. Это значит, что форсировка машины начальным давлением не потребует существенного изменения характеристик составляющих ее элементов, в частности, поверхностей теплообменных аппаратов.

Таблица 9

**Выработка тепловой энергии ЭТУ-1 за отопительный период
для широкого диапазона изменения ее граничных условий (МВт·ч/год)**

КПД элемен- тов, %	$p_p = 10$ бар				$p_p = 8$ бар				$p_p = 7$ бар			
	Начальное давление, бар				Начальное давление, бар				Начальное давление, бар			
	15	20	25	30	15	20	25	30	15	20	25	30
85	53,2	48,1	44,2	41,1	50,1	45,2	41,4	38,4	48,3	43,5	39,8	36,9
90	52,9	47,7	43,8	40,6	49,8	44,8	40,9	37,9	48	43,1	39,3	36,4
94	52,8	47,5	43,5	40,2	49,6	44,5	40,6	37,5	47,8	42,7	38,9	35,9

Электрическая энергия также является одним из ТП ЭТУ-1. Следует отметить, что привычная для всех нас электрическая энергия (ЭЭ) не является приоритетом среди других достойных видов энергии, получаемых в технологическом цикле ЭТУ-1. Представление данных по выработке ЭЭ в технологическом цикле ЭТУ-1 приводится ниже в табл. 10.

Таблица 10

**Выработка электроэнергии ЭТУ-1 за отопительный период
для широкого диапазона изменения ее граничных условий (МВт·ч/год)**

КПД элемен- тов, %	$p_p = 10$ бар				$p_p = 8$ бар				$p_p = 7$ бар			
	Начальное давление, бар				Начальное давление, бар				Начальное давление, бар			
	15	20	25	30	15	20	25	30	15	20	25	30
85	–	–	13,3	23,9	4,6	26,8	40,8	50,0	22,7	43,5	56,5	65,0
90	–	18,0	36,5	50,5	22,5	48,8	66,0	78,0	41,6	66,5	83,0	94,0
94	1,6	33,6	55,0	70,5	36,2	65,5	85,5	99,5	56,0	84,5	103,0	116,0

Одним из важных в настоящее время является седьмой технологический продукт, получаемый в энерготехнологической установке. Это экологический эффект. Этот вопрос в энергетической постановке поднимается в Республике Беларусь на данном уровне впервые. Общеизвестно глобальное потепление климата нашей планеты, причина которого – парниковые газы, выбрасываемые в атмосферу при сжигании органических топлив существующими энергоисточниками и теплотехнологическими установками. На рубеже 1990-х гг. правительства ряда промышленно развитых стран начали переговоры о возможностях предотвращения надвигающегося бедствия на нашу цивилизацию. Их результатом стало учреждение в 1990 г. Генеральной Ассамблеей ООН Межправительственного комитета по проведению переговоров по Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (РКИК). Этот комитет разработал Проект Рамочной Конвенции. Проект был принят 9 мая 1992 г. в штаб-квартире ООН в Нью-Йорке.

В Бразилии (Рио-де-Жанейро) 11 июня 1992 г. Республика Беларусь присоединилась к данному Проекту. Подчеркнем, что Беларусь была в числе стран – инициаторов Проекта. К концу 1997 г. РКИК выдвинул в ООН соответствующий Протокол, получивший в мировом сообществе название Киотского, согласно которому промышленно развитые страны и страны с переходной экономикой должны снизить антропогенные выбросы на 5 % по сравнению с 1990 г. Период действия этих обязательств – с 2008 по

2012 гг. Для вступления Протокола в силу требуется его подписание странами, которые выбрасывают в атмосферу не менее 55 % антропогенных выбросов. Россия определила число таких стран в 2004 г., тем не менее США (будучи основным загрязнителем атмосферы Планеты) к нему до сих пор не присоединились. Республика Беларусь 9 августа 2000 г. и 12 августа 2005 г. юридически завершила присоединение к Киотскому Протоколу (Указ Президента Республики Беларусь № 370, вступивший в силу 24 ноября 2005 г.). В соответствии с принятыми документами оговорены процедуры расчета за выбросы парниковых газов между странами, подписавшими Протокол.

Не вдаваясь в подробности, отметим что пересчет антропогенных выбросов ведется на диоксид углерода (CO_2), причем вводится торговля их квотами, согласно которым страны, уменьшившие выбросы, могут продавать подписантам любую (излишнюю) часть своей квоты по цене (предварительно) 5 дол. США за 1 т выброшенной (пересчитанной) углекислоты. В этой связи расчет экологической составляющей ЭТУ-1 целесообразно произвести в относительных единицах. За основу в данной работе принято такой расчет производить на единицу электрической мощности установки.

Расчет выполним для начальной температуры цикла 1400 °С, значений разделительного давления – соответственно 6, 7, 8 и 10 бар и режимов с максимальным КПД ЭТУ-1. Удельный выход углекислоты для этих режимов составляет соответственно 0,150; 0,149; 0,180; 0,250 кг/(с·кВт). Средняя величина может быть принята на уровне 200 кг/(с·кВт·10⁻³) или 0,72 кг/(ч·кВт). Тогда за год работы ЭТУ-1 выброс углекислоты будет уменьшен на 5,04 т/кВт. В денежном выражении на 100 МВт мощности ЭТУ-1 экологическая составляющая эффекта составит 2,52 млн дол./год. И, наконец, для мощности, эквивалентной мощности белорусской энергосистемы, экологическая составляющая эквивалентна 197 млн дол./год.

Отметим, что здесь не учтен эффект от снижения расхода топлива на получение данных мощностей за счет более высокого уровня экономичности ЭТУ-1 над существующими энергоустановками. Кроме того, не учтен эффект от снижения электропотребления при комбинированном производстве технологических продуктов в технологической схеме ЭТУ-1, по сравнению с существующими технологиями такого их производства. В заключение отметим, что фактическая величина экологического

эффекта при массовой реализации технологии ЭТУ-1 будет значительно выше.

ВЫВОДЫ

1. Представлено исследование характеристик головной энергоустановки. Основу расчета элементов технологической схемы ЭТУ-1 составляют температурные характеристики. Также приведены результаты расчетов некоторых температурных характеристик.

2. Рассмотрено влияние режимных факторов на расходные характеристики ЭТУ-1. Оценено количество получаемых технологических продуктов.

3. Рассмотрено влияние режимных факторов на энергетические характеристики ЭТУ-1. Энергетическими характеристиками ЭТУ-1 являются $\eta^{\text{ЭТУ-1}}$, $N_{\text{ЭТУ-1}}^{\text{ГТ}}$, $N_{\text{К}}^{\text{ЭТУ-1}}$, $N_{\text{ТД}}^{\text{ЭТУ-1}}$ и $N^{\text{ЭТУ-1}}$, $Q^{\text{ЭТУ-1}}$, коэффициент использования топлива, а также эксергетический КПД ЭТУ-1, приведены результаты их расчетов. Энергетические характеристики ЭТУ-1 имеют важное значение, так как они позволяют сделать вывод о целесообразности применения такой установки.

ЛИТЕРАТУРА

1. П а н т е л е й, Н. В. Комбинированная энерготехнологическая установка ЭТУ-1 и ее основные характеристики / Тез. докл. науч.-техн. конф. студ. и асп. БНТУ // Н. В. Пантелей. – Минск: БНТУ, 2003. – С. 67–68.

2. П а н т е л е й, Н. В. Комбинированное производство технологических продуктов энерготехнологической установкой ЭТУ-3 / Тез. докл. науч.-техн. конф. студ. и асп. БНТУ // Н. В. Пантелей, Е. А. Пантелей, Е. В. Кулак. – Минск: БНТУ, 2003. – С. 70–73.

Представлена кафедрой ТЭС

Поступила 5.05.2007